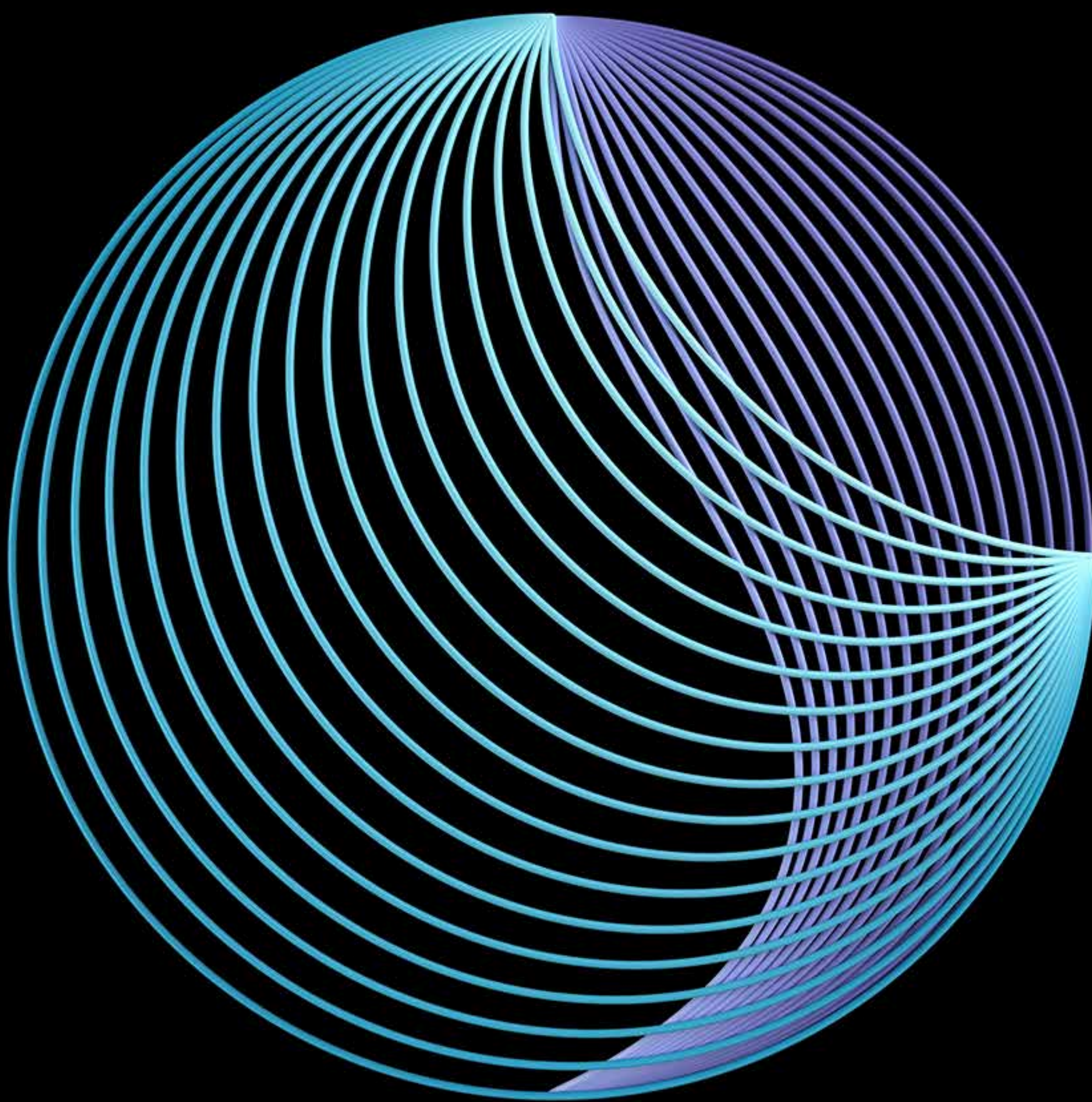
Deloitte.

BALLARD®



未来移动出行的动力源泉

氢能源及燃料电池交通解决方案
白皮书系列

系列一

德勤中国

财务咨询 

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

扫码免费领取资料



房中术(www.nblax520.com)专注于男性增大增粗增长、阳痿、早泄、壮阳、延时、强肾、回春、健身。女性缩阴、丰胸、减肥、化妆、瑜伽、保养、产后修复、盆底肌锻炼。两性健康,夫妻按摩,房中术,性姿势,性技巧,性知识等

更多免费教程：英语学习，技能提升，PS 教学，投资赚钱，音乐教程，口才教学，情商提升，风水教学，心理学，摄影知识，幼儿学习，书法学习，记忆力提升等等......

扫码加微信lax988988领取资料



==

全站课程下载

课程不断增加

本站现资源容量已超 10T

入群联系 QQ：167520299 或添加微信：1131084518（备注 学习）

阳痿早泄训练
皇室洗髓功视频教学
女人驻颜术
泡妞约炮万元课程
足疗养 SPA 教材
玉蛋功
马氏回春功
房中术张丰川
哲龙全套视频
增大盼你增大
国际男优训练
亚当德永早泄训练
洗髓功真人内部
皇室养生绝学道家洗髓功
【铁牛人会员课】男人必备技能，理论讲解
实战高清视频
随意控制射精锻炼 视频+图片+文字
价值 1440 元第一性学名著<素女经房中养生宝典视频>12 部
洗髓功修炼方法视频教学
陈见玉蛋功视频教学 女性缩阴锻炼
男性自然增大增长指南
强性健肾保健操 1-4
道家强肾系统锻炼功法
马氏回春功
12 堂课，全面掌握男性健康问题 让你重燃自信
联系微信：1131084518

1、东方性经
2、印度 17 式
3、口交技巧 3 部
4、港台性姿势 3 部
5、365 性姿势 6 部
6、泰国性爱密经 17 式
7、花花公子性技巧 6 部
8、阁楼艳星性技巧 7 部
9、古今鸳鸯秘谱全集 7 部
10、夫妻爱侣情趣瑜伽 2 部
11、古代宫廷性保健系列 14 部
12、汉唐宋元明清春宫图真人
13. 柔软性爱宝典 日本 9800 课
14. 李熙墨 3999 全套课
15. 妖精性爱课 2888
16. 李银河全套性课
17. 领统统性课
18. 德勇男性篇
19. 德勇男性篇
20. 缓慢性爱
21. 亚当多体位搭配篇
22. 亚当多体位结合篇
23. 德勇克服早泄讲座练习
24. 德勇以女性为中心得爱抚
25. 加藤鹰接吻爱抚舌技
26. 加藤鹰指技
27. 加藤鹰四十八手入门
28. 佐藤潮吹教学
29. 佐藤男人体能锻炼+保健品介绍
30. 佐藤男人早泄对抗训练
31. 阿拉伯延时训练
32. 田渊正浩秘籍
33. 异性性快感集中训练教学
34. 自我愉悦锻炼密宗
35. 铁牛全套延时训练课
36. Pc 机锻炼真人视频教学
37. 印度性经全集 8 部
38. 21 世纪性爱指南
39. 香蕉大叔男女训练馆全套
40. 中美真人性治疗教学+理论
41. 女性闺房秘术
42. 幸福玛利亚性课
43. 陈见如何释放性魅力征服
44. 性爱技巧讲座全套
45. 性爱秘籍全套
46. 性爱误区讲座
47. 性病讲解大全
48. 性博士讲座合集
49. 性健康和性高潮合集
50. 性教育讲座合集
51. 性能力课堂合集
52. 性生活问题解析合集
53. 意外怀孕和避孕处理课堂
54. 性感地带探索
55. 性技巧讲座
56. 性健康与性卫生讲座
57. 性生活专家答疑
58. 性心理与性道德合集
59. 性爱宝典合集
60. 性爱技巧合集
61. 完美性爱演示
62. 完美性爱技术讲解

更多精品等你来解锁哦...........

每日免费获取报告

1、每日微信群内分享**7+**最新重磅报告；

2、每日分享当日**华尔街日报**、金融时报；

3、每周分享**经济学人**

4、行研报告均为公开版，权利归原作者所有，起点财经仅分发做内部学习。



扫一扫二维码
关注公号
回复：**研究报告**
加入“起点财经”微信群。。

执行摘要

本白皮书由德勤与巴拉德动力系统有限公司联合撰写并发表，旨在介绍燃料电池汽车的奇妙技术及其商业应用。通过深入的研究和分析，本白皮书回答了行业高管和外界人士最关心的问题——燃料电池汽车的商业可行性如何，以及它们对环境的影响如何？

氢是宇宙中最丰富的物质之一。或许正因为氢的大量存在，我们有时会忘记了氢的价值。从最初作为初代内燃机的燃料，到现在氢气已经可以为空中旅行提供动力，并正在以燃料电池这一应用形式，又一次成为全人类能源革命中的焦点。

我们将陆续推出3卷白皮书对氢能进行介绍，并将全面解析氢能在未来将如何驱动移动出行领域的发展。本卷为白皮书系列的第一卷，将主要对氢能及燃料电池进行介绍，并通过总拥有成本分析对燃料电池车、纯电动车及燃油车进行深入对比。我们采取了自下而上的总拥有成本分析法（“TCO”），对美国、中国及欧洲的氢能源车进行了跨度长达13年的深入分析。通过对燃料电池车的购买成本进行拆分，我们对燃料电池车的燃料电池系统、电机等组件的价格均进行了测算；此外我们也对燃料费用、基础设施成本、维修费用等运营成本也分别进行了测算。我们相信通过这种分析方法，不仅对当前行业的研究成果进行了补充，也可以帮助我们的读者将这个TCO模型应用到各种类别的燃料电池车辆运营TCO测算中。事实上，我们在搭建了基础的TCO模型后，将其应用到了三个实际的燃料电池车辆运营使用案例中：上海的氢燃料物流车运营、加利福尼亚的氢燃料港口重卡运营及伦敦的氢燃料公交车运营。

我们的TCO分析展示了燃料电池车的良好发展前景。即使不考虑氢能的非定量优势（如零污染性排放等），仅就定量成本而言，在美国、中国及欧洲三个地区及各个实际应用案例中，燃料电池车的TCO均预计会在2029年之前低于纯电动车及燃油车的TCO。这一方面是由于技术进步及大规模生产带来的制造成本下降导致的，另一方面也受益于氢气价格、加氢站等运营相关的成本持续下降。因此各国政府开始投入越来越多的精力发展氢能相关技术及推动氢能的应用。

通过我们的TCO模型测算，2019年燃料电池车的每百公里总拥有成本约比纯电动车及燃料车分别高40%及90%左右。从购买成本看，较高的燃料电池系统价格及因为缺乏规模效应导致的零部件成本加价是购买成本较高的主要原因；从运营成本来看，较高的氢气价格是当前运营成本高昂的主要原因。

然而，预计到2026年，燃料电池车的TCO将会开始低于纯电动车，到2027年，燃料电池车TCO将会开始低于燃油车。总体来看，我们预计未来10年内燃料电池车TCO将会降低50%，燃料电池系统及氢气价格下降是主要驱动因素。其中燃料系统成本预计到2029年将下降超过50%。燃料电池系统成本下降空间较大，主要是因为当前燃料电池系统价格高企是由于高技术门槛和高制造成本导致的，而不是由于原材料成本较高导致的。当前有很多观点认为燃料电池价格较高的原因是使用了铂金作为催化剂，但实际上，铂金的成本在燃料电池系统总体成本中占比不到1%。与之相反，锂电池的金属材料成本如锂和钴则在电池总体成本中占据了很大比例。因此，技术进步及大规模生产可以驱动燃料电池系统价格显著下降。运营成本方面，其下降的主要驱动因素是氢气价格，受益于更多的可再生能源将用于氢气生产（目前由可再生能源生产的氢气占比还不到5%）及相关运输及存储技术的提升，预计氢气价格将在美国、中国、欧洲等国家和地区均明显下降。

我们的TCO预测采取了非常保守的假设。实际上历史经验表明，随着新兴技术的出现，生产成本的下降往往会比预测值要大的多；此外，我们也没有将任何政府补贴（车辆购买补贴、加氢站建设补贴、加氢站运营补贴等）或政府激励纳入到TCO模型中。从上海、加利福尼亚及伦敦的案例分析来看，由于政府补贴或对燃油车的额外路税将使得燃料电池车的TCO更快地与纯电动车及燃料车的TCO实现交叉。此外，我们仍假设燃油车成本变动较为稳定，但实际上，燃油车成本可能由于油价上涨、更严格的排放标准出台、市区准入限制、燃油车禁令等无法量化的原因而大幅上升。因此，考虑到其他因素，燃料电池车的TCO有可能会在2025年之前就低于电动车及燃油车的TCO。

最后，本文还对燃料电池车的能量转换效率、氢气生产、和温室气体排放等燃料电池技术相关的环境影响进行了现状分析及未来展望。事实上这并不是本白皮书的研究重点，我们将会在第3卷*白皮书中进行更为详细的讨论，但是我们相信在本白皮书中引入关于氢产业链的基础分析，将有助于我们的读者更好的理解氢能相关价值链及未来发展趋势。当前燃料电池车的能量转换效率是高于燃油车，但低于纯电动车的，这主要是由于氢气生产过程的低效及能量损失。而在未来，风力及光伏等可再生能源将会在制氢过程中发挥更大作用，提升燃料电池车的能量转换效率。因为当前可再生能源受到季节、高峰低谷使用周期等因素的影响较大，产生了大量被浪费的过剩电力。可再生能源的边际成本接近于零，使得其定价低于其他当时生产的电力，而因为过剩电力浪费情况的存在，新能源电力在欧洲某些国家甚至有负电价情况出现。而氢能恰好可以利用这些可再生能源，将过剩的电力以氢气的形式储存起来。

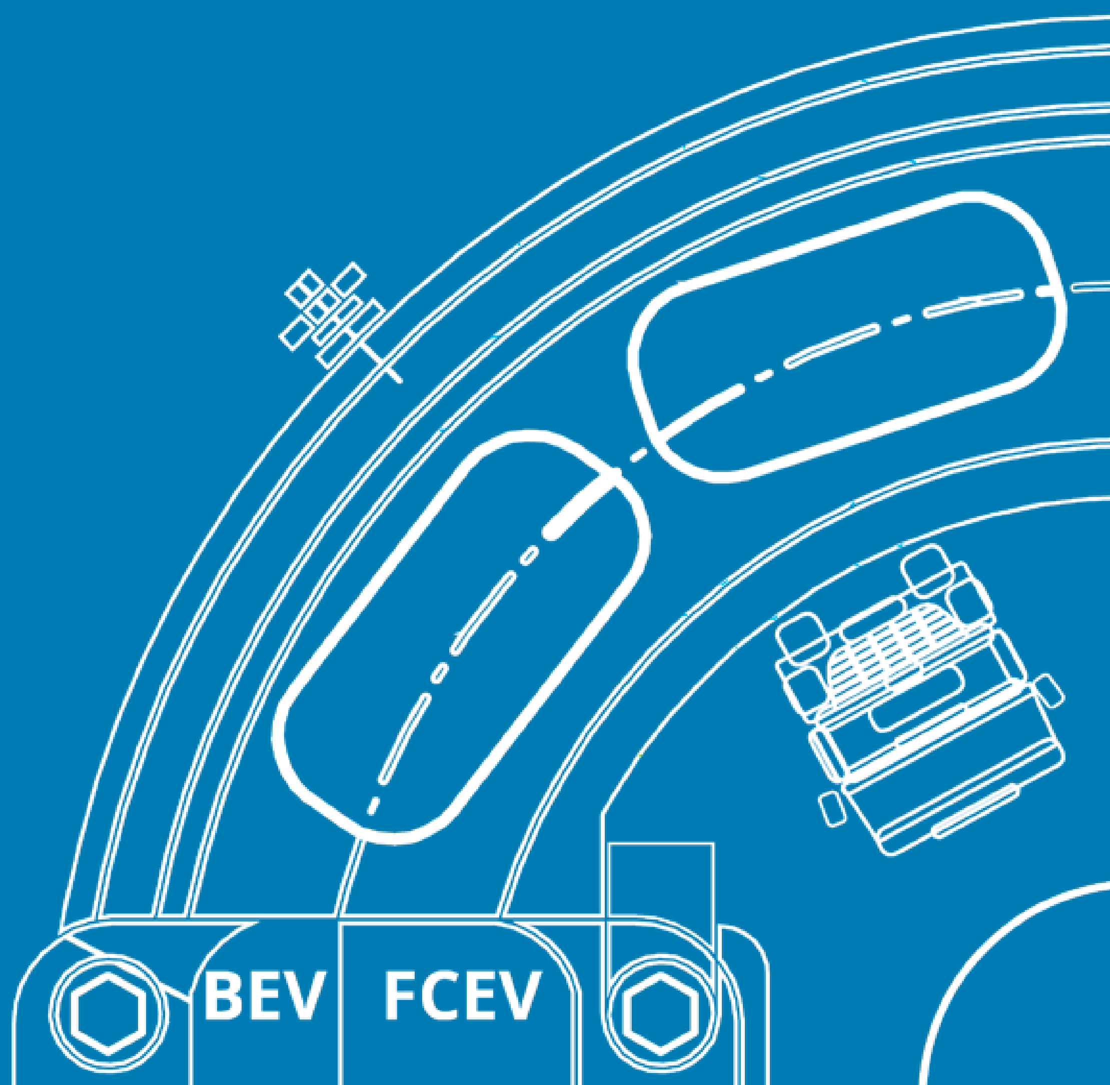
从环境影响的角度来看，燃料电池车是最清洁的，相较于的电动车及燃油车，燃料电池车的全生命周期碳排放是最少的。而随着可再生能源更多的应用于氢气制取，及氢气运输技术的提升，预计燃料电池车的碳排放还将继续降低。同时，相较于纯电动车，燃料电池车在制造过程中的碳排放也较低。因为电池生产过程中使用了大量金属材料如锂和钴等，金属材料的挖掘、生产加工等过程均有大量能量消耗及碳排放。同时燃料电池车回收在报废阶段也比电动车回收更容易且更有经济吸引力。

正如比尔盖茨的名言："我们总是高估未来两年将发生的变化，低估未来十年将发生的变化。不要让自己陷入无所作为的状态。"我们希望本白皮书可以对我们的读者理解氢能及氢能如何应用在交通领域提供一些帮助，尽管我们的努力可能微不足道，我们也希望竭尽所能的为创造更加经济合理的商业模式及更加绿色的世界而做出一些微小贡献。

注释：*三卷白皮书系列包括：1.交通出行中的氢燃料电池解决方案；2.氢和燃料电池的应用现状和未来；3.氢供应链的演进与未来

目录

目录	3
燃料电池简介	5
燃料电池车应用概述	22
总拥有成本分析	35
能源效率与环境影响的比较	67
总结与展望	89
参考文献	91
联系我们	101


BEV
FCEV

燃料电池简介

1.1 什么是燃料电池

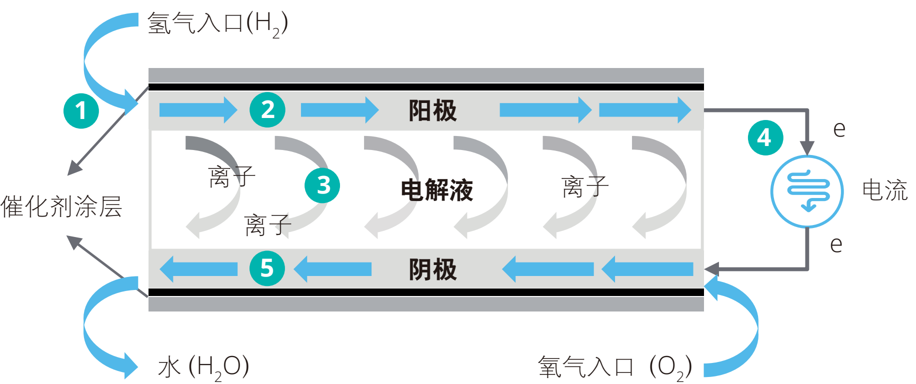
广义上来讲，燃料电池是通过化学反应，将燃料及氧化剂中蕴含的化学能转换为电能的装置[1]。最近，燃料电池这个词几乎被专门用来形容以氢作为燃料的反应堆[2]。

氢气作为汽车燃料已经有很长的历史了。在200年前，氢气就被用在第一代内燃机中作为燃料，与现在内燃机里汽油等燃料工作原理类似[3]。但是因为安全性及能量密度较低，氢气作为内燃机燃料并没有表现出优越性[7]。然而，在如今的燃料电池技术中，氢气并不直接燃烧，而是和氧气反应转换为电能[4]。

氢气和氧气的化学反应是非常简单的，可以用如下公式表示：$2H_2+O_2=2H_2O$[5]。 在燃料电池中，氢气和氧气分别进入到电池的阳极和阴极（图1）。电池两极之间通过电解液隔离，一方面可以阻止电池两极的反应物相互接触，一方面为阳极产生的离子提供到达阴极的通道。

如图1所示，燃料电池反应原理如下：氢气首先进入燃料电池的氢电极（称为阳极）（步骤1），然后氢气与覆盖在阳极上的催化剂反应，释放电子形成带正电荷的氢离子（步骤2），氢离子穿过电解液到达阴极（步骤3）。然而，电子不能通过电解液，相反，电子流入电路，形成电流，产生电能（步骤4）。在阴极，催化剂使氢离子与空气中的氧结合形成水，水是燃料电池反应中的唯一副产品（步骤5）[6]。

图1：燃料电池反应堆工作原理



燃料电池可以简单的根据电解液的不同分为几种不同的类别，主要的燃料电池类型包括：质子交换膜燃料电池（“PEM”），碱性燃料电池（“AFC”），磷酸燃料电池（“PAFC”），固体氧化物燃料电池（“SOFC”）以及熔融碳酸盐燃料电池（“MCFC”）。图2对不同燃料电池进行了对比。PEM目前是处于商业化最前沿的燃料电池，因为PEM可以在50-100摄氏度下运行，启动时间较短，同时对氧化剂要求较低，空气就可以作为其氧化剂来源[8]。这些特性使得PEM成为汽车能源的理想解决方案，并且使得PEM从20世纪90年代开始得到了快速发展[10]。

图2：燃料电池的5种类型对比[9]

燃料电池类型	电解液	运行温度/°C	催化剂	主要优势	主要劣势	应用领域
PEM	质子交换膜	50-100	铂金	• 启动快 • 室内温度较低 • 可以将空气作为氧化剂	• 对CO敏感 • 需要将反应物加湿	• 汽车 • 便携式电源
AFC	碱性电解液	90-100	镍/银	• 启动快 • 工作温度较低	• 需要纯氧作为催化剂	• 航空航天 • 军事
PAFC	磷酸	150-200	铂金	• 对CO_2不敏感	• 对CO敏感 • 启动较慢	• 分布式发电[1]
SOFC	固体氧化物	650-1,000	LaMnO3/LaCoO3	• 可以将空气作为氧化剂 • 较高的能量效率[2]	• 运行温度较高	• 大型分布式发电 • 便携式电源
MCFC	熔融碳酸盐	600-700	镍	• 可以将空气作为氧化剂 • 较高的能量效率[2]	• 运行温度较高	• 大型分布式发电

注释：1.用多种小型，连接电网的设备发电和储能； 2. 热电转换效率可以达到85%，纯电转换效率约为60%

图 3：氢燃料电池的主要应用及示例

种类	主要应用	示例
交通	乘用车	
	卡车	
	叉车	
	公交	
	物流车	
	航空器	
	船只	
	电动自行车	
固定电源	热电联产系统（“CHP”）	
	不间断供电系统（“UPS”）[1]	
	分布式发电	
其他应用	便携式电源	
	无人机（“UAVs”）	

氢燃料电池可以被广泛的应用于各个场景中，主要的应用可以被分为3类：交通、固定电源及（如便携式电源）（图3）[11]

注释：1. 不间断供电系统可以在主输入电源故障时对外供电

1.2 燃料电池及燃料电池车发展历史

燃料电池并不是一个新产物，最早的燃料电池可以追溯到1839年，是由威尔士科学家威廉·格罗夫（William Grove)发明出的原型[12]。然而燃料电池车首次成为焦点是在20世纪70年代——石油危机推动了氢燃料电池在汽车上的应用[14]。在接下来的几十年，不同国家和地区的科学家为了推动燃料电池车的发展做了不懈的努力[14]。 在多年的研发投入下，丰田在2014年推出了全球第一辆商业化的燃料电池车。在此之后，燃料电池车在公众眼中不再是一个只存在于实验室中的车型，而是驱动未来汽车变化的主要技术之一。从2014年开始至今，中国、美国、日本及欧洲的一些国家开始着力于推动氢燃料电池技术的发展[14]。图4列举了关于燃料电池及燃料电池车的发展简史 。通过政府政策鼓励、技术进步及产业参与度提升等多方面的投入，燃料电池的应用已经进入了一个黄金时代。



图4：燃料电池及燃料电池车的发展简史



1.3 不同国家及地区的氢燃料及燃料电池发展情况

与大多数先进技术一样，燃料电池技术在初始研发时对政府的政策依赖较高。中国、美国、欧洲、日本等国家政府出于不同的原因，都不同程度出台了相关政策及鼓励措施，促进了燃料电池产业的发展，并在燃料电池核心技术研究上进行了大量投资。上述国家对燃料电池的发展制定了补贴政策和中长期战略规划，通过对各国政府政策及产业发展的分析，可以获得各国氢燃料及燃料电池的政策端启示。图5对每个国家的氢燃料相关政策重点进行了概括，我们将在后续的文章中进一步详细讨论。

图5：主要国家的氢燃料相关政策概览[1]

	美国	中国	欧洲	日本
国家战略	• 早在1990年，美国政府就颁布了《氢能研究、发展及示范法案》，制定了氢能研发5年计划 [13] • 通过在氢能方面的长时间持续投入，美国已经形成了一套系统的促进氢能发展的法律、政策和科研方案 [30]	• 尽管与其他国家相比，中国的氢能发展相对较晚，但中国目前正在大力发展氢能 • 2016年，氢能被列为《能源技术革命创新行动计划》中的15个关键领域之一 [25] • 2019年两会期间，氢能首次写入政府工作报告 [26]	• 2003年，欧盟25个国家启动了欧洲研究区项目（"ERA"），其中包括建立欧洲氢燃料电池技术研发平台 [13] • 2019年，燃料电池和氢能联合会（FCHJU）发布了《欧洲氢能路线图》，提出了到2030年及2050年氢能发展的路线图 [34]	• 氢能被列为日本的"国家能源"，日本政府致力于使日本成为氢能社会 [30 31 32] • 2014年，日本通过了第四个战略能源计划，并公布了氢气及燃料电池战略路线图，为氢气的生产、储存、运输和应用指出了发展路径 [33]
氢气生产及运输	• 2019年美国能源部发布公告，将为H2@Scale2概念提供最多3100万美元的资助，这笔资金将用于氢气生产方式创新试验，以及一个综合的氢气生产、存储及加气试点系统 [35]	• 全国范围内没有明确的氢气生产及加气的补贴政策 [27] • 氢气目前被列为危险化工品，是氢能发展的主要阻力之一 [27]	• 对氢气的清洁生产较为重视 • 欧洲氢能路线图指出要在2030年以极低的碳排放实现约三分之一的氢气生产 [34]	• 氢气及燃料电池战略路线图： – 到2020年中期建立一个以商业为基础的氢气高效分配系统 [24] – 到2040年实现零碳排放氢气的制造、运输和储存 [24]

注释：1. 哈维球表示了不同国家及地区政策的重要程度及完成度，只是代表相对次序，并不表示实际进度；2. H2@Scale是一个为了在美国多个行业实现价格合理，可靠的大规模氢气生产，运输，储存和应用的概念，同时，还整合了各种价值数十亿美元的国内产业、提高了国内竞争力，并创造了就业机会

	美国	中国	欧洲	日本
氢气基础设施	• DOE启动了H2USA-—个和燃料电池车整车厂商合作的PPP项目，来推动氢气基础设施建设[36] • 加利福尼亚燃料电池联盟 （“CaFCP”）提出要在2030年达到1,000个加氢站[37]	• 没有明确的全国范围内的氢基础设施补贴政策[27] • 佛山、中山等多个市级政府正在制定地方补贴政策[25] • 然而，加氢站建设的审批程序仍不清楚[27]	• 2009年，德国成立了H2 Mobility，投资建设了世界上第一个全国性的加氢站网络[39] • 欧洲氢路线图指出预计到2030年将建设3,700个加氢站[34]	• 2016-2018，日本经济产业部已经向加氢站的研发投入了约8,800万美元，向加氢站建设投入了约5.39亿美元的建设补贴[23]
乘用车支持政策	• 2014年，美国政府在《作为经济可持续增长路径的全面能源战略》明确了氢能在交通运输转型中的主导作用[13] • 加利福尼亚燃料电池联盟提出要在2030年达到1,000,000辆氢燃料电池车[37]	• 面向燃料电池车购买者的补贴将至少持续到2025年[28] • 与纯电动车类似，政府将首先推动燃料电池车在商用车领域的应用，因为商用车更易监管及实现大规模应用[28]；在商用车领域率先实行并没有写入政策中，主要在执行阶段，会先从商用车入手[28]	• 欧洲氢路线图指出，预计到2030年，燃料电池乘用车保有量达370万辆[34]	• 在以丰田为首的整车厂商研发投入下[40]，日本的氢燃料电池车以乘用车为主[29] • 根据《2017氢能战略》，2030年目标达到800,000氢燃料乘用车[23]
商用车支持政策	• 2018年，加利福尼亚空气资源委员会（“CARB”）已经为“海岸到仓库 (Shore to Store) ”项目拨款4,100万美元，以测试10辆8级氢燃料重卡在港口的应用情况[38]		• 欧洲氢路线图指出，预计到2030年，燃料电池轻型商用车达50万辆、燃料电池卡车及公交车保有量达4.5万辆[34]	• 根据《2017氢能战略》，2030年计划达到1,200辆氢燃料公交车和10,000辆叉车的保有量[23]

注释：1. 哈维球表示了不同国家及地区政策的重要程度及完成度，只是代表相对次序，并不表示实际进度

美国

美国是第一个将氢能及燃料电池技术作为其国家战略的国家[31]。由于石油危机的发生，美国政府从20世纪70年代开始对氢能研究进行了大量资助[41]。早在1990年，美国政府就颁布了《氢能研究、发展及示范法案》，制定了氢能研发5年计划[13]。2002年，美国能源部发布了《国家氢能发展路线图》，为公共部门及私人部门如何协调长期发展氢能提供了蓝图[13]。在2012年，美国国会重写了氢能燃料电池政策，将加氢站相关资产的税收优惠从30%提升至50%，并建立了分级税收奖赏制度，加大了对高效燃料电池（如利用热电联产的燃料电池）的奖赏力度[51]。在2014年，美国政府颁布了《作为经济可持续增长路径的全面能源战略》，在其中明确了氢能在交通运输转型中的主导作用[13]。10月8日被燃料电池及氢能协会选为全国氢能及燃料电池日，同年得到了参议院第217号决议的指定，标志着氢能及燃料电池的地位日益重要[49]。如图6所示，通过美国各氢能组织的不懈努力，美国氢能相关政策几乎已经覆盖了氢能全产业链。

美国氢能和燃料电池的研发主要由能源部牵头，建立了以能源部国家实验室为主导，高校、科研机构、企业为补充的研发体系，关键技术的研发将获得资金拨款支持[31]。通过在氢能方面的长时间持续投入，美国已经形成了一套系统的促进氢能发展的法律、政策和科研方案[30]。图6标注了主要的政府政策及举措时间表。2019年3月，美国能源部发布公告，将为H2@scale1提供最多3100万美元的资助，用于实现美国多行业中氢气生产、运输、存储及利用的规模化[34]。

为了进一步推进燃料电池的广泛应用及解决氢气基础设施的问题，美国能源部启动了H2USA——一个和燃料电池车整车厂商合作的PPP项目，来推动氢气基础设施建设，以支持美国消费者选择氢能源驱动的交通工具[36]。美国在氢能源多年来的投资在实践中取得了明显成效。在燃料电池车的商业应用方面，美国拥有全球最多的氢燃料乘用车。截至2019年8月，美国的氢燃料乘用车销量及租用数量已经达到7,271辆[44]。除此之外，截至2019年4月，美国已经有了超过30,000辆氢燃料叉车[335]，这些叉车主要应用于沃尔玛及亚马逊等美国企业[50]。

由于州政府及公众对可再生能源的大力支持，加利福尼亚是美国氢燃料电池车商业化程度最高的州[46]。截至2019年6月，加州有6,830辆燃料电池车在运营，数量远超其他州[37]。自2010年6月，加州能源委员会发放了第一笔拨款，加州已经开了35个零售加氢站，另有29个加氢站正在建设中[45]。加州空气资源委员会和加州燃料电池联盟在推进氢燃料电池车商业化进程方面发挥了重要作用[47]。加州已经发展出了一套完整的“规划-补助-评估”系统，成为美国最活跃及最具示范性的氢燃料电池应用范例[48]。展望未来，加州燃料电池联盟提出了到2030年建设1,000座加氢站及达到100万辆燃料电池车的目标[37]。

注释：1. H2@Scale是一个为了在美国多个行业实现价格合理，可靠的大规模氢气生产，运输，储存和应用的概念，同时，还整合了各种价值数十亿美元的国内产业、提高了国内竞争力，并创造了就业机会

图6：相关政策/倡议覆盖范围及时间表

年份	政策/倡议	氢气生产及运输	加氢站	乘用车支持	商用车支持
1974	迈阿密大学举办“迈阿密氢能源经济”会议（THEME）	✓	✓		
1990	美国能源部-《氢能研究、发展及示范法案》[54]	✓			
1996	美国能源部-《1996年氢未来法案》[55]	✓	✓		
2002	美国能源部-《国家氢能源发展路线图》[53]	✓	✓	✓	✓
2003	美国能源部- 《氢燃料发展倡议》[56]	✓	✓	✓	✓
2006	美国能源部和美国交通部-《氢能源计划》[57]	✓	✓	✓	✓
2012	美国国会-《美国燃料电池和氢基础设施法案》[51]	✓	✓		
2013	美国能源部启动了H2USA—一个和燃料电池车整车厂商合作的PPP项目，来推动氢气基础设施建设以推动燃料电池车的大规模应用[36]	✓	✓	✓	✓
2014	美国白宫办公厅-《全面能源战略》[52]			✓	✓
2019	美国能源部宣布了高达3,100万美元的氢能源资助计划[34] 加州燃料电池联盟（The California Fuel Cell Partnership）提出了到2030年建设1,000座加氢站及达到100万辆燃料电池车的目标[37]	✓	✓	✓	✓

中国

中国的第一辆燃料电池车是在1999年研发的[60]。中国是全世界最大的氢气生产及消费市场，并拥有全世界最大的氢气生产能力，目前工业用氢气产能达到了2,500万吨/年[31]。在消费端，自2017-2019年，中国已经卖出了3,000辆氢燃料电池车 （均为商用车），使得中国成为燃料电池车的主要市场之一[64]。

中国巨大的氢燃料市场规模受益于多年来相关的政策支持及激励措施。自2011年以来，中央政府已经接连发布了鼓励氢能及燃料电池技术发展的顶层方针及指导方案。如《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》、《能源技术革命创新行动计划（2016-2030年）》、《节能与新能源汽车产业发展规划（2012-2020年）》 及《中国制造2025》[21]。此外，为了促进新能源汽车的发展，政府对乘用车生产采取了一种“双信用管理制度”，即对新能源车的生产给予正积分而对传统内燃机车的生产给予负积分[188]。该系统将来也可能应用于商用车[189]。2016年，氢能被列为《能源技术革命创新行动计划》中的15个关键领域之一[25]。随着中国正在全国范围内努力向可再生能源过渡，氢能将在这一过程中发挥越来越重要的作用[63]。氢能的应用有助于缓解中国能源体系中存在的许多突出问题，例如能源安全及可持续性问题[65]。2019年两会期间，氢能首次写入政府工作报告，表明中央政府越来越重视氢能的发展[26]。

在燃料电池车方面，自2014年以来，中国在氢燃料电池车产业上作出了重大努力，推动燃料电池技术成熟，降低氢气成本，以推动氢能在各个领域的应用。值得注意的是，氢能并不是中国唯一被关注的可再生能源，燃料电池车的发展是与电动车的推动同步进行的[28]。与电动车的发展历程类似，中国首先关注的是燃料电池车在商用车领域的应用，因为商用车较易监管也更容易进行大规模应用。

中央政府及地方政府的补贴是燃料电池车产业发展的关键驱动因素之一，补贴主要包括如下三个方面：

- 对购买燃料电池车的消费者进行补贴。尽管对纯电动车的补贴正在退坡，但预计对燃料电池车的补贴将会持续到2025年。根据专家访谈，随着燃料电池车的应用规模逐渐扩大，燃料电池车的补贴将也会逐渐退坡，并对购买车型所应用的技术及性能逐渐提出更高的要求[28]
- 对加氢站建设进行补贴。目前对于加氢站的补贴没有一个全国范围的清晰指引，但一些地方政府如佛山、中山等已经设立了地方政府补贴政策[25]。佛山市是中国氢能源发展位于前列的城市之一，佛山市为每个新建加氢站提供最高800万人民币的补贴[62]。
- 对氢气进行补贴。根据专家访谈，对氢气的补贴主要是为了降低消费者使用燃料电池车的燃料成本，使得使用氢燃料的汽车每百公里燃料费用与普通柴油车及汽油车持平或更低，但对氢气的补贴具体是给终端消费者还是加氢站仍然处于讨论中[28]。

尽管氢能源发展得到了政府支持及相关政策推动，但中国的氢能源相关产业仍有较大的进步空间，例如在相关政策和配套设施方面还有改进的空间。根据专家访谈，对行业影响较大的相关改进措施包括[27]：

- 对加氢站及氢气生产运输的相关政策
- 将氢气从危险化学品类别中剔除
- 明确加氢站审批流程
- 对燃料电池的关键部件实现国产替代及批量生产以降低燃料电池车的生产成本

2019年6月，发改委[1]关于《促进汽车循环经济发展实施方案》获得了相关部门的批准，主要举措包括：取消地方政府对新能源车限购及车牌限制，中央政府将继续对新能源车提供补贴，及加速取消对皮卡进入城区的限制[66]。预计发改委的方案将在短期内刺激新能源车（包括燃料电池车）的销量提升（图7）。

图7：《促进汽车循环经济发展实施方案》对汽车市场的影响



注释：1. 中华人民共和国国家发展和改革委员会

欧洲

欧盟将氢能源视做能源安全及能源转型的重要方向[31]。2003年，欧盟25个国家启动了欧洲研究区项目（"ERA"），这个项目中包括要建立欧洲氢燃料电池技术研发平台，用于攻克氢能行业及燃料电池中的关键技术问题[13]。 2008年，欧盟成立了燃料电池及氢能联合会 （"FCHJU"），这是一个PPP项目，在欧洲发展及推广燃料电池技术的过程中中发挥了重要作用[67]。

2019年2月，FCHJU发布了《欧洲氢能路线图：欧洲能源转型的可持续路径》，提出了到2030年和2050年氢能发展的路线图，为氢能和燃料电池在欧洲的大规模推广指出了路径[34]。

- 这份路线图对氢能产业相关的利益方提出了重要建议：
  - 监管者及产业方应该联合起来共同为各行各业减少碳排放制定清晰、可实现的长期路径
  - 欧洲产业方应该大力投入氢能及燃料电池技术的研发，以保持在氢能产业中的竞争力，抓住行业中的新机遇[34]。
- 这份路线图为氢能在以下领域的发展提出了具体的关键节点目标（图8）：
  - 在交通领域，预计到2030年达到370万辆氢燃料乘用车，50万辆氢燃料轻型商用车，及4.5万辆氢燃料重卡和公交车的氢燃料汽车保有量。同时，到2030年，预计将有570辆氢燃料火车替代现有的火车[34]。
  - 在加氢站方面，预计2030年将有3,700个大型加氢站
  - 在制暖方面，预计2030年氢气可以取代约7%的天然气（以量计算）为250万户家庭供暖，到2040年，可以取代32%的天然气为1,100万户家庭供暖[34]。
  - 在氢气生产方面，预计在2030年以极低的碳排放实现约三分之一的氢气生产，这些氢气可以被用于各行各业如用于石油炼制中的加氢反应，及生产合成氨等[34]。
  - 在发电方面，预计到2030年氢气发电厂也可以得到大规模的概念验证。由于有大量未被利用的新能源电力（如弃风弃光等），这些新能源由于没有合适的储电设备，发出的电会被浪费，预计到2030年，这些被浪费的电力可以用于生产氢气，而这些由可再生能源生产的氢气也可以用于发电，最大程度的避免新能源的浪费[34]。

图8：欧洲2030年氢能发展路线图 [34]

欧洲氢能路线图	2030年目标			
氢气生产及运输	预计在2030年以极低的碳排放实现约**三分之一**的氢气生产，这些氢气可以被用于各行各业如用于石油炼制中的加氢反应，及生产合成氨等	大量未被利用的新能源可用于制氢 建设氢气发电示范工厂 建设可再生氢气制取的工厂		
加氢站	**3,700**个大型加氢站			
乘用车支持	氢燃料乘用车保有量达到**370万辆**			
商用车支持	**50万辆**氢燃料轻型商用车	**4.5万辆**氢燃料重卡和公交车	**570辆**氢燃料火车	

德国是欧洲氢能及燃料电池技术的领先国家。为了推广氢能及燃料电池，德国成立了国家氢能及燃料电池组织（"NOW"），这个组织负责管理及协调国家氢能及燃料电池创新项目（"NIP"），及德国联邦国土交通省下的电动车部署项目（"BMVI"）[68]。2006年德国联邦政府联合研究机构代表及各个产业方共同发起了NIP项目，旨在提升氢能在德国能源体系中的地位[69]。2006-2016年期间，NIP资助了约14亿欧元用于氢能相关的研究、开发及示范项目[70]。2009年，德国政府与法国液化空气集团（"Air Liquide Group"），林德集团（"Linde Group"），壳牌（"Shell"），道达尔（"TOTAL"）及其他公司共同发起了"H2 Mobility initiative"，计划投资3.5亿欧元在德国建立一个全国性的氢燃料补给网络系统[39]。截至2018年末，欧洲已经有了152座加氢站，其中41%都位于德国[71]。

尽管英国是最早发现氢气及制造氢燃料电池车的国家，但相较于欧洲其他国家如德国等，英国政府对氢能及燃料电池的政策支持缺乏整体性，直到2016年英国才出台了第一个氢能发展整体战略[72]。2014年，E4tech及元素能源发布了氢能及燃料电池路线图，其中包括了氢气供应链路线图（如氢气的生产及运输）、终端消费路线图（如运输工具）等11个子路线图。这份路线图，作为零排放战略的一部分，旨在加快氢能及燃料电池的发展速度[72]。2017年1月，欧盟的JIVE项目资助了欧洲5个国家部署139辆零排放燃料电池客车，其中56辆在英国[73]。

日本

在我们所研究的国家中，日本或许是最致力于建设氢能源社会的国家。由于地理位置及环境限制，可再生能源在日本非常受重视[30]。最初日本希望依靠核能实现可再生能源战略，但福岛核电站事故迫使政府重新审视其能源战略[30]。现在，氢能源被确立为"国家能源"，日本政府已经承诺要将日本建设为氢能社会[30 31 32]。

在2014年，日本通过了第四个战略能源计划。这个计划明确指出要加强氢能源的利用，并公布了氢气及燃料电池战略路线图，明确了氢气的生产、储存、运输和应用的发展路径[33]。在2015年，NEDO*发布了一份关于氢能源的白皮书，将氢能源定位为国家发电的第三个支柱能源[32]。在2017年，日本政府发布《氢能源基础战略》，指出要在2030年实现氢能源发电的商用化[30]。METI** 在2018年为氢能及燃料电池产业投入了2.6亿美元的研发费用[75]。

日本的燃料电池商业化应用处于世界前沿，这些应用包括民用固定热电联产式燃料电池发电系统，工业用燃料电池，及燃料电池交通工具等。民用固定热电联产式燃料电池发电系统在2009年首次实现了商用化，使日本成为第一个将燃料电池引入民用领域并为住宅提供电力及热水的国家[33]。 截至目前，日本已经在商业建筑及居民住宅引入了超过了20,000个固定热电联产式燃料电池发电系统[78]。

燃料电池车是日本的又一焦点。日本汽车制造商-丰田、本田和日产从20世纪90年代起就一直致力于燃料电池车的研发。2014年，丰田推出了首款商用化的燃料电池车-Mirai，成为燃料电池车发展历史上的重要里程碑，随后本田也推出了商用化燃料电池车-Clarity[40]。和其他国家不同，日本的燃料电池车是在乘用车领域率先发展起来的[75]。根据日本新能源产业技术综合开发机构的数据，截至2019年6月，燃料电池车已经在日本售卖出3,219辆[44]。除了乘用车，日本计划在2020年日本东京奥运会上至少投放100辆氢燃料公交车[77]。

随着燃料电池车在日本的应用逐渐增多，日本的氢气基础设施建设也处于领先地位。政府资助及行业联盟共同推动了加氢站密度的增加。2018年，由日本丰田、日产等11家公司组成的财团成立了日本"H2 Mobility"公司。计划到2021年在日本建成80座加氢站[32]。目前日本有127座加氢站，是世界上加氢站最多的国家[42]。

注释：*NEDO：新能源产业技术综合开发机构；** METI：经济产业部

根据氢能理事会，交通运输是氢能及燃料电池技术最重要的应用领域之一[82]。从大多数已经开始探索燃料电池应用方式的国家来看，燃料电池车的应用是各国实现其能源战略及达到低碳目标的重要路径之一。

将氢燃料电池应用在交通工具中可以追溯到1966年[79]。但由于基础设施的缺乏，这项新技术无法得到广泛应用[80]。然而由于燃料电池技术的优势，使得各国政府持续探索如何将其作为一种清洁无排放的能源进行广泛应用。

理论上来说，燃料电池可以广泛的应用于各种交通工具上，但火车、无人机和电动自行车等工具目前仍处于早期开发阶段，部署有限[11]。

由于目前乘用车及商用车是氢燃料技术应用的前沿领域[81]，本文将主要分析氢燃料乘用车及氢燃料商用车的应用情况。图9显示了燃料电池技术如何应用在各个车型中，而图10则从政策的角度分地区列示了燃料电池车及加氢站的数量及未来目标。我们将在第二节对各个车型的细节进行探讨。

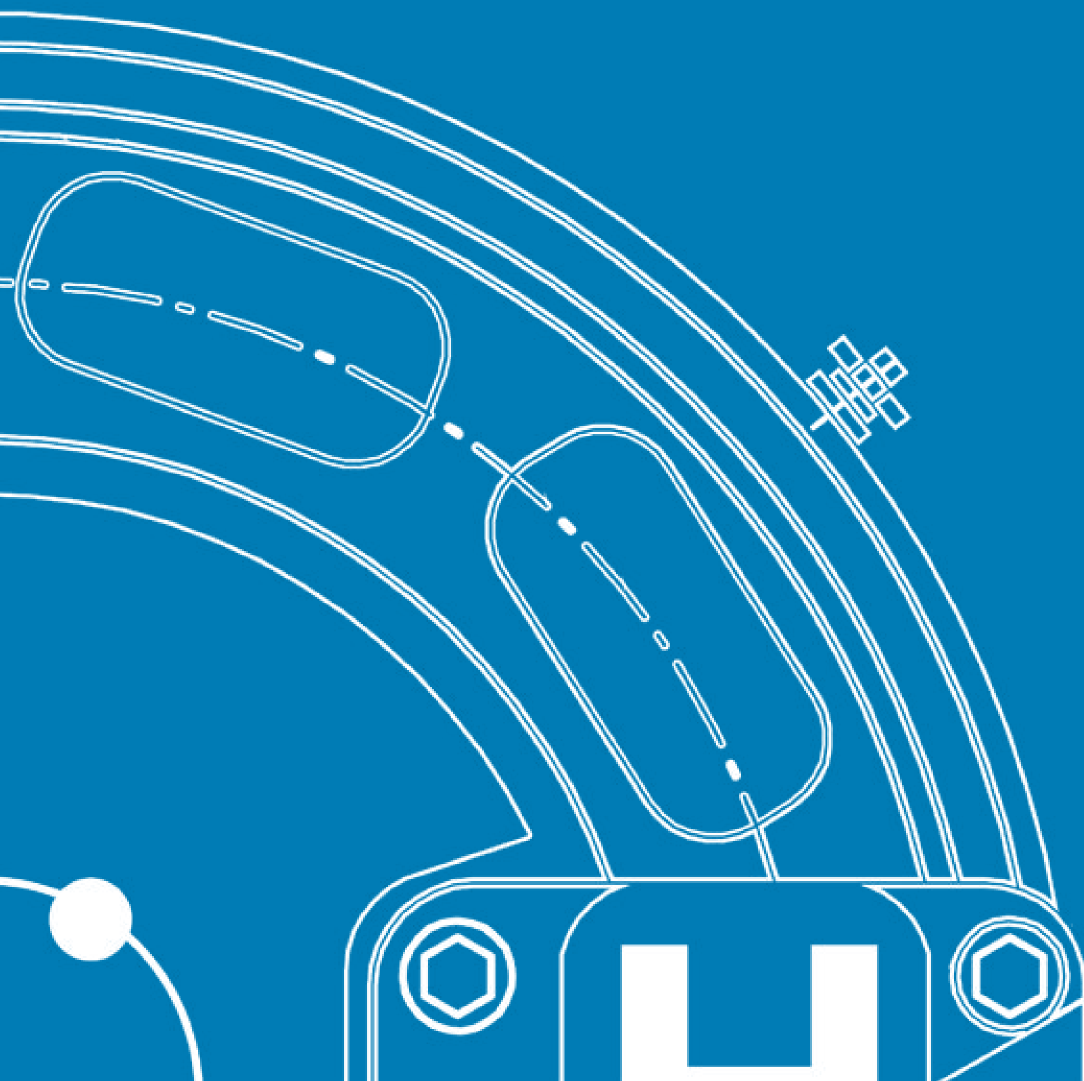
图9：典型氢燃料乘用车及商用车车型



图10：当前分地区*燃料电池车和加氢站数量及目标

		乘用车	公交车及客车	卡车**	叉车	加氢站
美国	当前	7,271 [44]	35辆已投入使用，39辆在开发中	测试中	>30,000 [335]	~42 [37]
	目标		2030年：5,300,000辆氢燃料电池车辆上路 [337]		2030年：300,000辆 [337]	2030年：7,100 [337]
中国	当前	0	2,000+ [64 83 84 85]	1,500+ [94]	2	23 [89]
	目标	2020年：3,000台 [87] 2030年：100万台 [336]	2020年达到11,600辆氢燃料商用车 [87]			2020年：100 2030年：500
欧洲	当前	~1000+ [42]	~76 [42 73 86]	~100 [88]	~300 [42]	~152 [71]
	目标	2030年：3,700,000 [34]	2030年达到45,000辆氢燃料卡车及公交车 [34]			2030年：~3,700 [34]
日本	当前	3,219 [44]	18	N/A	160	127座，还有10座正在建设中
	目标	2020年：40,000 2025年：200,000 2030年：800,000 [24]	2020：100 2030：1,200 [24]		2020：500 2030：10,000 [24]	2020：160 2030：900 [24]

注释：*日本、美国及中国的数据截至2019年4月，欧洲数据中德国数据截至2019年7月；**因为不同信息来源中对卡车分类的定义不同，因此我们将轻卡及重卡共同在卡车中测算，具体车型的分类会在第二节中进行详细分析



燃料电池车应用概述

对于大多数不了解的消费者来说，燃料电池车听起来极其复杂和精密。然而，当燃料电池车被分解成各个模块时，它其实是非常简单的。正因为这种简单性，燃料电池技术已经被广泛应用于各种车型。

本节会介绍不同车辆类型和及燃料电池技术在不同车型中的潜在应用前景。这将为深入分析燃料电池在某些车型的应用奠定基础，并提供一个逻辑入口。

首先，让我们介绍一下燃料电池车的基本部件，并解释一下它们的简单工作原理。我们还将比较和对比燃料电池车、纯电动车以及传统燃油车之间的零部件差异。

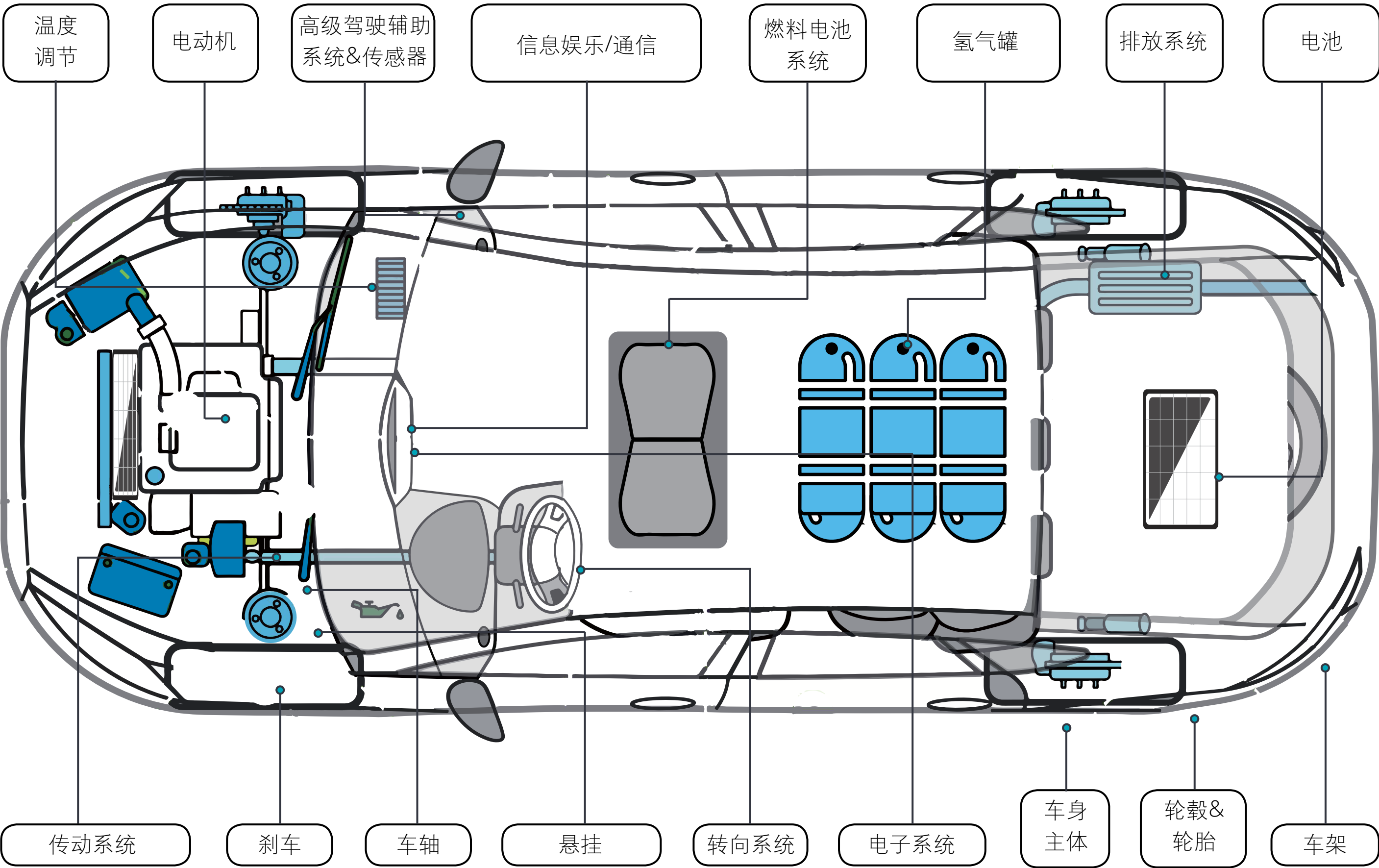
2.1：燃料电池车的基本部件

如图11所示，与大部分现代化汽车一样，燃料电池车由四个基本模块组成：动力系统、底盘、汽车电子系统和车身[90 96 97]。动力系统通过燃料电池系统和电动机为汽车提供动力。这种能量来源于氢，氢储存在车辆的压力罐中[91]。燃料电池堆将这些能量转化为电能，并由电池作为辅助一同驱动电动机。这与纯电动车的原理没有太大不同，但是燃料电池车的电池容量要小得多。因为纯电动车的电池用于储存驱动汽车所需的全部能量，而燃料电池车只需使用电池来辅助稳定燃料电池的输出功率： 在功率需求较低时吸收额外的电力，在功率需求大时释放电力[92]。

从理论上讲，纯电动车具有更高的能源效率，正如我们将在第4节中讨论的那样，但是过大的电池重量降低了这种优势，特别是对于长途运输用的重型车辆。纯电动车必须为每多行驶一英里增加更多的电池容量，从而给车辆增加额外的重量[94]。比如在特斯拉的电动重卡模型中，预计其电池重量可以达到4.5吨[95]。而燃料电池车就没有这样的问题，因为其所携带的氢气质量远小于同等能量所需的电池质量。这是因为氢具有更高的比能——大约120MJ/kg，而电池的比能是5MJ/kg[94]。

除了动力系统，车辆的其他部件基本上是相同的。车辆底盘包括传动、转向、制动和行驶系统。车辆电子系统主要由底盘控制系统，安全系统和车辆电子产品比如信息娱乐/通信，高级驾驶辅助系统（“ADAS”）以及传感器等构成。最后，车身包括车身主体、座椅和内饰[93]。

图11. 燃料电池车部件



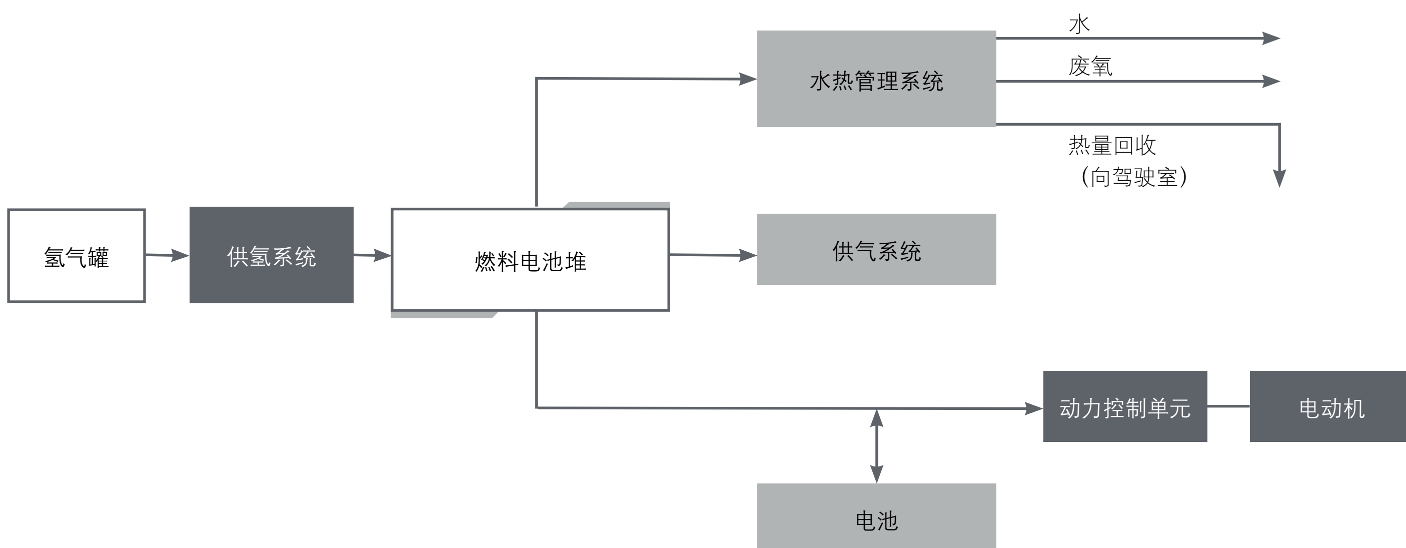
模块	零部件子模块	零部件
动力系统	能源存储	氢气罐
	燃料系统	燃料电池系统，电池组
	动力机	电动机
	排放系统	排放系统
底盘	传动装置	传动装置
	转向系统	转向系统
	刹车	刹车
	行驶系统	轮毂与轮胎、车架、悬挂、车轴
电子系统	电子控制系统	底盘控制系统、安全系统等
	车辆电子产品	信息娱乐/通信，高级辅助驾驶系统、传感器，温度调节
车身	车身	车身主体，座椅，内饰

在燃料电池车中，燃料电池系统由燃料电池组和辅助系统组成。如下图12所示，燃料电池堆是核心部件[98]，它将化学能转化为电能为汽车提供动力。燃料堆的详细原理已在第1节中说明，因此这里不再赘述。

燃料电池系统除燃料电池堆外，还有四个辅助系统：供氢系统、供气系统、水管理系统和热管理系统[99]。供氢系统将氢从氢气罐输送到燃料电池堆；由空气过滤器、空气压缩机和加湿器组成的供气系统为燃料电池堆提供氧气[99]；水热管理系统采用独立的水和冷却剂回路[99]来消除废热和反应产物（水）[100]。通过热管理系统，可以从燃料电池中获取热量来加热车辆的驾驶室等，提高车辆的效率[94 101]。

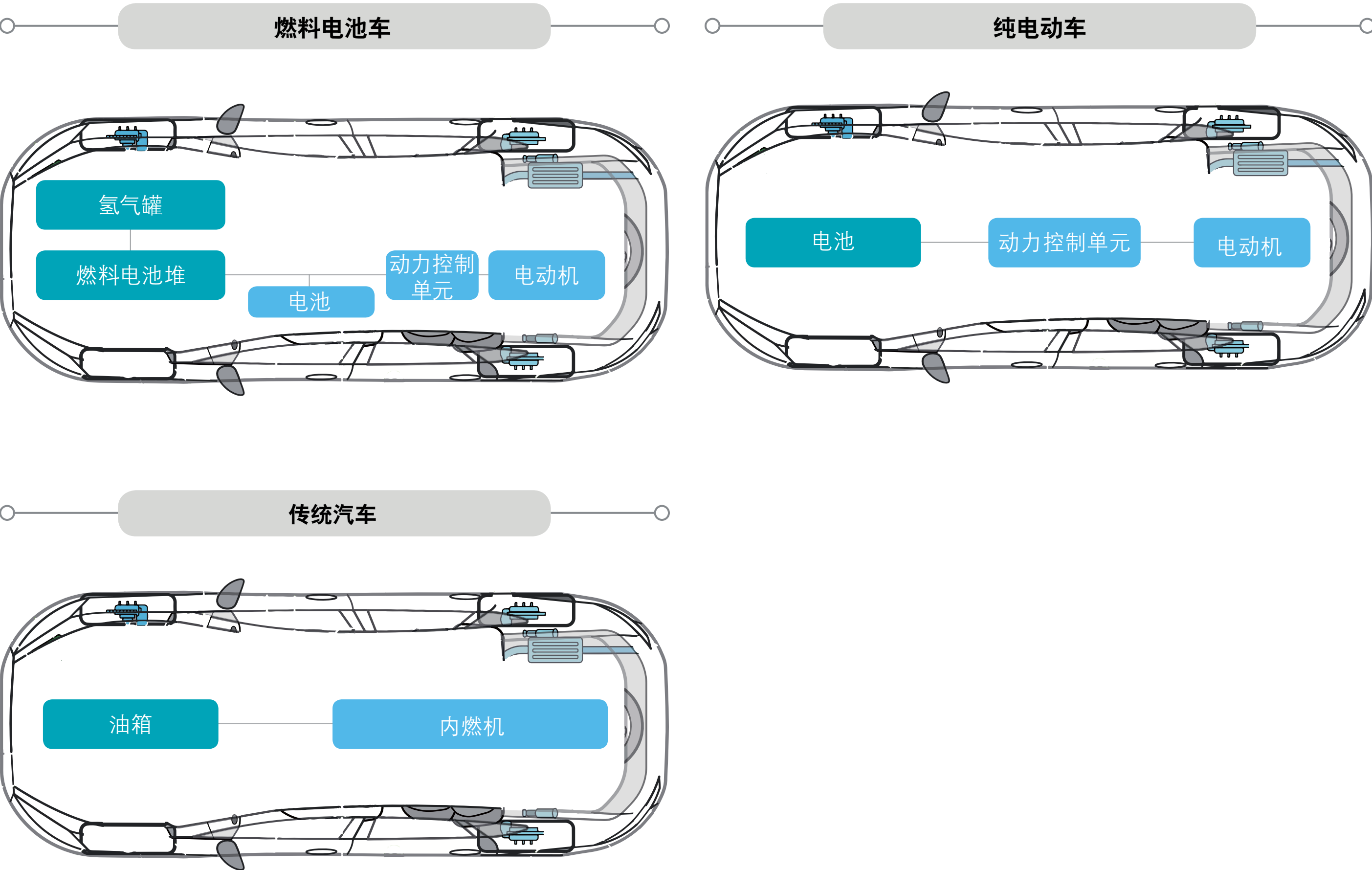
燃料电池系统产生的电力通过动力控制单元（“PCU”）传到电动机，在电池的辅助下，在需要时提供额外的电力[99]。

图12. 燃料电池车运行原理



注释：*在本白皮书中，燃料电池系统包括燃料电池堆、辅助系统（BoP）、燃料电池电控，不包括氢罐等

图13. 燃料电池车的动力系统和其他动力系统



如图13所示，燃料电池车与其他车辆的主要区别在于动力系统。所有其他零部件本质上是相似的，因此这里没有突出显示。

燃料电池车和纯电动车通过电动机将电能转化为动能，而汽油和柴油车在内燃机中将燃料燃烧产生的热能转化为动能[102]。

燃料电池车和纯电动汽车的主要区别在于电的来源。与燃料电池车不同的是，纯电动汽车的全部能量来自其电池组，电池组在充电站进行外部充电[91]。

2.2：燃料电池车，纯电动汽车和燃油车在不同车辆类型中的应用

如前所述，燃料电池车由于其简单性和灵活性而具有广泛的应用场景。燃料电池车和电动车都是为了促进零排放和可持续交通系统所采用的传统燃油车的替代方案[103]。如图14所示，许多国家都出台了禁止燃油车的政策[106]。使用燃料电池车和电动车这类的清洁能源汽车已经成为不可否认的未来趋势。

与燃料电池车相比，纯电动车的开发和应用在大多数场景中更加成熟，但由于电池重量和续航里程问题而受到限制[104 105]。

如图15所示，纯电动车的真实环境续航里程通常比其官方公布的实验路况下的续航里程有较大的折扣。电池性能也容易受到外界环境的影响，如图16所示，低温对续航里程影响较大[106]。

此外，燃料电池车提供了与传统燃油车类似的加油体验——不需要充电站基础设施，而这种充电站基础设施在住宅区和高速公路沿线是很难实现的[94]。纯电动车及其充电站基础设施的全面商业化将对电网系统产生影响。英国国家电网预测，到2050年，电动车的电力需求将在45太瓦时左右，约占全国电力需求的10%[106]。

图14. 纯燃油车禁令规划 [106]

国家	纯燃油车禁止年份
英国	2040
法国	2040
德国	2040 （预期）
西班牙	2040
荷兰	2025
加拿大	2040
印度	2030

图15. 纯电动车续航里程 [106 334]

车型	官方里程 （km）	实际里程 （km）
日产聆风 30kwh	270	199
大众 e-Golf	299	232
宝马 i3 120Ah	358	257
雷诺 Zoe Z.E. 40	402	299
特斯拉 Model S 75D	489	391
BYD 秦 EV450	480	400

图16. 温度对电池续航里程的影响 * [106]

温度 （°C）	续航里程 （km）
-15	207
-5	225
5	272
15	283**

注释：*以雷诺ZOE Z.E. 40 为实验样本
**实际里程基准线

图17. 燃料电池车，纯电动汽车和燃油车在各种应用场景中的应用现状概述

	代表车型	特征[107 108 109]	燃料电池车[108]	纯电动车[1]	燃油车
乘用车		为载客设计，通常少于7座	已投入市场	已广泛接受	成熟应用
商用车					
公交车		用于城市公共交通，通常30-50座	已投入市场	已广泛接受	成熟应用
厢式/轻型货车		用于同城物流，车辆总重量（"GVW"）小于4.5吨（有效载荷小于3吨，对应于美国1类和2类	试点阶段	已广泛接受	成熟应用
中型卡车		用于同城和城际物流，总重量4.5-12吨（有效载荷3-8吨，对应美国3-6级）	试点阶段	试点阶段[338]	成熟应用
重载卡车		用于总重量大于12公吨的长途运输（有效载荷大于8吨，对应于美国7-8级）	原型阶段	试点阶段[339]	成熟应用
特殊用车					
叉车		用于在短距离内搬运材料的工业货车	已投入市场	成熟应用（室内仓库）	成熟应用（室外仓库）
采矿车		为采矿作业设计的越野自动倾卸卡车	原型阶段	原型阶段	成熟应用

应用现状：

- **原型阶段**：尚无产品推出，公司正处于产品开发阶段
- **已投入市场**：产品发布并公开销售，可以实现商业化应用
- **成熟应用**：产品已在大多数场景应用
- **试点阶段**：在小范围内对产品进行测试或试点
- **已广泛接受**：产品被终端客户普遍接受

自本世纪初以来，不同类别的燃料电池车已经开始逐步进入了原型设计和生产阶段，经过政府和业内人士多年的努力，现在几乎所有车辆类型都有燃料电池车的产品或原型（图17）。对于乘用车而言，燃料电池车已经可以进行商业化应用了，但由于加氢基础设施有限，且购置成本高，因而当前使用率仍较低[110]。在商用车领域，叉车、公交车、轻型和中型卡车一直处于燃料电池商用车应用的前沿[111]。

注释：1.由于有效载荷和续航里程的限制，纯电动车尚不是"全面服务"车辆

图18. 燃料电池乘用车应用现状概述

	中国	日本	欧洲	美国
代表性产品	• 上汽集团在2016年推出了荣威950的插电式混合动力版 • 中国燃料电池车品牌格罗夫于2019年推出了中国第一辆燃料电池乘用车	• 丰田Mirai • 本田Clarity (仅供租赁)	• 丰田Mirai • 本田Clarity (仅供租赁) • 现代途胜 • 现代Nexo	• 丰田Mirai • 本田Clarity (仅供租赁) • 现代途胜 • 现代Nexo
应用现状	• 2018年，中国尚未实现燃料电池乘用车的销售[114] • 在上海的一个联合国试点运营项目和汽车共享服务中使用了50辆荣威950插电式燃料电池混合动力版[119]	• 丰田Mirai分别于2017年和2018年在日本销售了575辆和766辆[114]	• 2017年和2018年，丰田Mirai在欧洲分别销售了132辆和160辆[113] • 共享汽车公司Clever Shuttle和BeeZero分别拥有20和50辆燃料电池车	• 丰田Mirai分别于2017年和2018年售出1,700辆和1,838辆[113]
应用程度				

应用程度：

以每年新登记的燃料电池乘用车数量表示，通过Mirai、Nexo等典型车型的销售数据估算[113]

<100　　100-500　　>500

燃料电池乘用车（图18）

第一款由商业流水线量产的氢燃料电池乘用车可以追溯到2014年的丰田Mirai[117]。然而，在美国、欧洲和日本，当前燃料电池乘用车的每年采购量只有几百或几千辆[113]。

燃料电池乘用车提供了一个在使用性上与传统燃油车相似的零排放解决方案。燃料电池车只需要3-5分钟就可以充满氢燃料，单次加氢可以行驶250-350英里，与燃油车相当[112]。

早期使用燃料电池车的主要是租赁公司、车队运营商[115]、政府机构和企业客户。由于缺乏广泛的加氢基础设施的限制，个人客户较少。然而，随着基础设施的增加，预计未来个人消费将会大大增加[118]。

图19. 燃料电池公交车应用现状概述

	中国	日本	欧洲	美国
应用现状及案例	• 2003年，3辆奔驰氢燃料电池公交车在北京进行了首次测试[124] • 2017年，中国首条商业化运营的燃料电池公交线路由飞驰巴士在佛山云浮运营[125] • 截至2018年，在上海、佛山、张家口、成都等城市运营的燃料电池公交车已超过200辆[120]	• 2018年，丰田推出了第一款燃料电池公交车Sora，预计在2020年东京奥运会和残奥会之前，将陆续在东京市区推出100多氢燃料电池辆公交车[123]	• 作为燃料电池公交车应用的第一步，CHIC*项目在2010-2016年期间在8个国家部署了60辆公交车[86 73] • 从2017年开始，JIVE**项目（第一阶段）将在5个国家部署139辆燃料电池公交车，并得到巴拉德和其他合作伙伴的技术支持，其中英国有56辆，德国有51辆[73] • 到第二阶段，JIVE将在本世纪20年代初在欧洲部署近300辆燃料电池公交车[73]	• 截至2019年4月，在NFCBP***、TIGGER****和其他政府项目的资助下，美国[42]有35辆燃料电池公交车正在进行积极的试点，以确定燃料电池公交车的可靠性和耐久性的优化改进
主要制造商	• 福田欧辉客车 • 宇通客车 • 青年汽车 • 中通客车	• 丰田	• Van Hool • Solaris • Wrightb	• New Flyer • ENC 集团
应用程度				

应用程度：

以估计的运营中燃料电池公交车数量表示[120 121 42]

<50 50-200 >200

燃料电池公交车应用现状概述（图19）

目前，燃料电池公交车是应用最广泛的燃料电池车车型之一。这是因为它们大多是对公众运营，并有非常稳定可预测的运营模式[109]。公交车的典型特征是有规律、可预测的路线，因此它们只需要很少的加氢站。此外，政府部门所采取的提倡措施对公交运营商的影响也很大，这使得公交车成为燃料电池技术早期应用的绝佳选择。燃料电池公交车还是一个对社会有展示意义的绿色社会所倡议的绿色公共交通方式的模板[121 122]。

然而，燃料电池公交车的广泛应用仍面临挑战。首先，与化石燃料相比，氢的价格仍然很昂贵[121]。其次，虽然燃料电池系统总体上是可靠的，但与内燃机相比，由于技术相对较新，可能会出现技术问题，导致操作人员效率低下；这同样适用于维修和零部件更换，不过这些问题预计会随着技术应用的成熟而得到缓解[121]。

注释：*CHIC：欧洲城市清洁氢项目；**JIVE：欧洲氢燃料汽车联合倡议；***NFCBP：国家燃料电池公交车计划；****TIGGER：减少温室气体和能源消耗交通投资项目

图20. 轻型和中型燃料电池卡车应用现状概述

	中国	日本	欧洲	美国
应用现状和案例	• 中国最大的燃料电池车运营商氢车熟路目前运营约500辆燃料电池车，服务于京东和上海申通快递等物流和电子商务公司[126] • 2018年，500辆有效载荷3.5吨、续航里程330公里的燃料电池卡车在上海部署。卡车由东风公司生产，采用巴拉德燃料电池堆技术，由上海中外运负责同城运输[136]。另外还有600辆燃料电池卡车于2019年4月部署。[140]	• 2017年，丰田和7- 11便利店达成协议，从2019年开始测试和部署燃料电池中型送货卡车[137]。	• DHL预计2020年将在德国部署100辆“氢能源板车”；该款货车是一种4.25吨的商用燃料电池货车，最大行驶里程可达500公里，由卡车制造商StreetScooter生产[127] • H2ME*是支持燃料电池车在欧盟应用的主要力量，到2021年雷诺Kangoo燃料电池车将部署约900辆，170辆已部署[88]，用于车队和商业运营	• 燃料电池混合动力货车项目是由美国能源部领导的一个试点项目，旨在提高电动中型卡车的商业可行性。目前有17辆燃料电池车与UPS合作[128] • 联邦快递于2014年开始在加州和田纳西州测试20辆燃料电池增程货车[138]，并于2018年启动了另一个与Workhorse和Plug Power合作的燃料电池货车测试项目[139]。
主要制造商	• 上汽大通 • 飞驰客车 • 东风客车 • 中通客车 • 福田汽车 • 奥新新能源	• 丰田	• 雷诺 • StreetScooter • 奔驰	• Workhorse • UPS • FEDEX
应用程度				

应用程度：

以运营中的轻型和中型燃料电池卡车估计数量表示

<100　　100-500　　>500

轻型和中型燃料电池卡车应用现状概述（图20）

在我们研究的主要市场中，围绕轻型和中型燃料电池卡车的部署采取了各类方案和行动，且大多由私营部门主导（尽管有政府的支持），这与公交车形成了有趣的对比[130]。

主要由于以下几点原因：燃料电池技术被认为是一个同城和城际物流强有力的竞争者。从技术角度来看，燃料电池卡车的续航里程通常超过150公里，这使得它们能够完成大部分同城和城际的货物运输[131]。其次，燃料电池卡车可以满足城市地区更严格的环境要求和噪音法规，这鼓励了政府和车队运营商加速采用燃料电池车[132]。第三，与纯电动车相比，燃料电池车加氢时间非常短，大大提高了物流车队的作业效率[133]。

货运占城区交通流量的很大一部分（例如在欧洲占8-15%[129]），这使得燃料电池技术很有希望成为一种主要的城市减排方式。预计在不久的将来，轻型和中型燃料电池卡车在同城和城际物流中的应用将会继续增长，尤其是在中国，其商业基础设施的发展速度非常快[134 135]。

注释：*H2ME：欧洲氢能源交通出行项目

图 21：重载燃料电池卡车应用现状概述

	中国	日本	欧洲	美国
应用现状和案例	• 2017年，中国重汽宣布了中国第一辆燃料电池重型卡车——燃料电池港口重卡[141] • 福田汽车集团正在开发燃料电池重型卡车的车型[145]	• 丰田在2017年推出了一款8级港口重型卡车[151] • 目前尚无公开部署	• 2017年，ESORO推出了全球首款34吨级燃料电池卡车[153]。 • 从2017年到2020年，H2-Share*项目将建造和测试由VDL在欧洲开发的27吨刚性卡车[149]; • 2018年，现代宣布计划从2019年到2023年向瑞士H2 Energy公司提供1,000辆燃料电池重型卡车[150]。	• 燃料电池卡车快速通道项目和洛杉矶港"从海岸到仓库"运输项目是美国推动燃料电池重型卡车应用的两个代表性项目，分别部署了10辆和5辆燃料电池卡车[144]。 • 美国初创卡车公司尼古拉汽车（Nikola Motor）计划推出一款氢燃料半挂卡车Nikola Tre，预计将在2023年投入量产。安海斯-布希公司（Anheuser-Busch）已经订购了800台[42]。
主要制造商	• 中国重汽 • 福田汽车	• 丰田	• E-Truck • ESORO • VDL • 现代	• 肯沃斯 • 尼古拉 • 丰田
应用程度	原型阶段	原型阶段	试点阶段	试点阶段

应用程度：

由燃料电池重型卡车应用阶段表示

原型阶段　　试点阶段

重载燃料电池卡车应用现状概述（图21）

考虑到高污染和温室气体排放[54]，重载卡车被认为是开发零排放汽车的一个非常有前景的细分市场。燃料电池重型卡车的发展相对滞后于其他应用，大多数主要的制造商都处于研发阶段，只有有限的产品推出或测试[52]。

燃料电池重型卡车发展相对缓慢，这是由于车辆成本高、氢燃料成本高（长途运输重负荷）和有限的加氢基础设施造成的[146 148]。

从积极的方面来看，与纯电动卡车相比，燃料电池重型卡车可以提供更快的加氢时间，这对于车队减少日常运营中的等待时间至关重要。与相同规格的纯电动卡车相比，燃料电池重型卡车也具有更长的续航里程[148]。燃料电池技术正变得越来越成熟，并针对重型车辆的应用进行了优化。最终，燃料电池重型卡车可以提供接近传统车辆的续航里程和充能时间，同时还有零排放的优势[147]。这为燃料电池重型卡车在长期内取代柴油和纯电动重型卡车提供了巨大的潜力。

注释：*H2-Share：针对重型运输的氢解决方案，旨在减少欧洲西北部的排放

图22. 燃料电池叉车应用现状概述

	中国	日本	欧洲	美国
应用现状和案例	• 广东省佛山市政府计划在2025年前引进5,000台燃料电池叉车，虽然这仍处于早期规划阶段[155]; • 潍柴动力已与巴拉德电力系统公司建立合资企业，开发用于叉车的燃料电池[160]。	• 2018年，丰田在其Motomachi工厂部署了20辆燃料电池叉车，并在该工厂建设了一个加氢站[156]。	• 供暖系统领先制造商菲斯曼（Viessmann）宣布，该公司在2013年采用了氢燃料电池叉车来承担日常仓库操作[157]; • 法国维埃尔河畔的家乐福已经从Still购买了137部燃料电池叉车，用于在家乐福的物流基地运营[159]。	• 2014年，沃尔玛开始与Plug Power合作投资生产叉车。2014 - 2018年，沃尔玛仓库燃料电池叉车数量从1,700台增加到8,000台; • 2017年4月，亚马逊宣布与Plug Power公司合作并计划将其11个仓库[50]中的纯电动叉车替换为燃料电池叉车。
主要制造商	• 无	• 丰田	• STILL • 林德 (Linde)	• 海斯特 (Hyster) • 林德 (Linde) • Plug Power
应用程度				

应用程度：

以估计的运营中燃料电池叉车数量表示[42]

<100　　100-1000　　>1000

燃料电池叉车应用现状概述（图22）

叉车是燃料电池技术的前沿应用。首先，叉车在技术要求和基础设施方面比其他车型有优势，叉车所需的最大输出功率仅为乘用车的十分之一[50]。此外，由于叉车主要在仓库等小范围区域作业，因此对加氢站数量需求不高。第三，燃料电池叉车比其他类型的清洁能源叉车有优势， 随着时间的推移电池放电会使得电压下降，导致叉车的速度减慢及生产效率下降。如电动叉车工作4小时后，再继续工作4小时的话速度会平均下降14%[158]，而燃料电池叉车可以实现稳定的工作效率。最后，由于燃料电池车辆没有污染排放，因此非常适用于空间封闭的仓库，尤其食品饮料仓库等有较高卫生要求的仓库[50]。

燃料电池叉车正处于商业化阶段，尤其是在美国，燃料电池叉车的保有量已超过2.5万辆。在中国，燃料电池叉车的使用目前还比较有限，但是已经有很多公司开始对燃料电池叉车进行相关的开发，这也得到了各地区政府的政策支持[161 162]。

燃料电池技术在采矿车上的应用现状

那些面临严重降低碳排放挑战的采矿公司逐渐认识到，燃料电池采矿卡车是一种很好的零排放替代方案。与传统柴油矿车和纯电动矿车相比，燃料电池采矿设备具有以下优点：

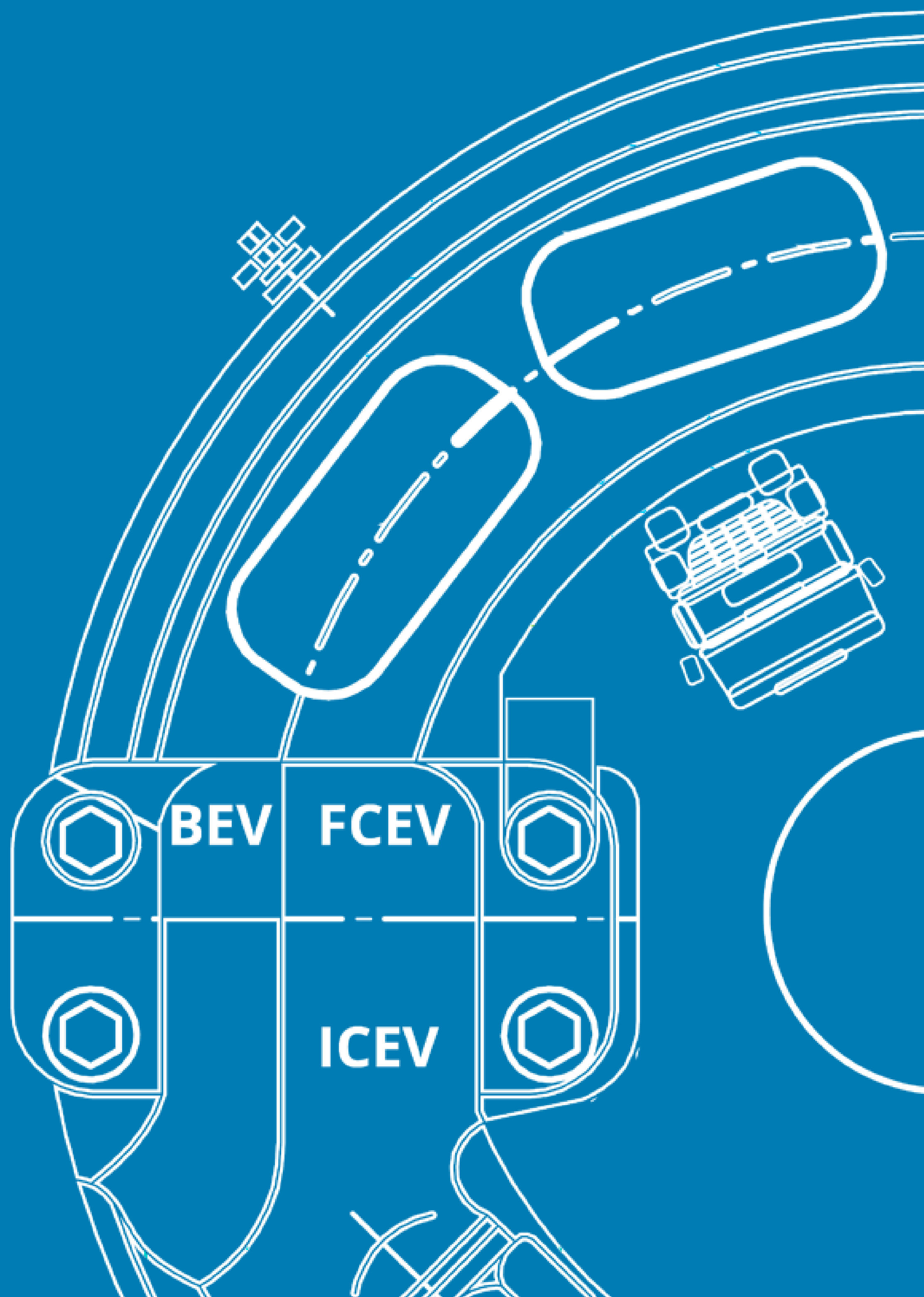
- 理论上，它可以达到与柴油车相同的机动性、动力和安全性能。同时，它一方面享有与电动车一样的清洁性，而另一方面又可以在更短的时间内进行加氢，并运营更长的续航里程[163]。
- 与柴油矿车相比，燃料电池采矿设备不会在地下环境中排放有害气体，从而减少对矿工健康的影响[109]。

但目前市场上燃料电池矿车产品有限，尚没有广泛的试点，说明燃料电池矿车的发展仍处于初级阶段。几家公司正在开发燃料电池矿车，例如在中国，潍柴集团于2018年与多家行业合作伙伴合作开发了200吨燃料电池矿车[164]。在美国，英美资源集团（Anglo American）也在研究新的采矿技术，包括燃料电池矿车[165]。目前来看，燃料电池采矿车的应用还需要进一步的技术研究和政府支持[109]。

第2.3节 结论

正如在本节中所看到的，燃料电池车由于其简单性和灵活性而具有广泛的在各种类型汽车上的应用前景。在本节中，我们重点介绍了从乘用车到采矿车的各种车辆类型，并展示了每种类型的燃料电池车型在全球各个市场的应用情况。

那么，燃料电池车究竟是如何被运营者使用的呢？这些运营的实际总成本是多少？随着技术的不断成熟，这些又会如何变化？让我们在下一节中探讨这些相关的问题。


BEV
FCEV
ICEV

总拥有成本分析

3.1 TCO模型分析框架

对新技术来说，深入探讨其商用可能性是非常必要的。我们建立了燃料电池车、纯电动车及燃油车的TCO（总拥有成本）模型，以量化并对比不同车型的成本，测算燃料电池车的经济效益。在我们的TCO模型中，我们采用了自下而上的极细颗粒度的建模方法，通过分析具体到每一个组件的成本来构建一辆汽车的总成本，如2.1节所示。除此之外，我们还考虑了燃料成本、维修费用，及加氢/充电设施建设费用等运营成本。这个框架确保了分析结果在不同领域和不同应用场景下的高度适用性。我们在图23中对TCO模型的框架进行了详细阐述。

我们的TCO模型是从车辆运营者的角度进行分析，之所以要进行如此深入的TCO分析，是为了从车辆制造和运营的角度，准确地了解是哪些组件在推动当前和未来的成本。一旦弄清楚成本结构及关键部件的成本变动后，我们就可以将这个TCO模型应用到不同的运营商及商业模型中，如物流车车队（案例1）、港口运输运营商（案例2）、及城市公交车运营商（案例3）。模型中关于费用组成部分和未来趋势的总框架将保持不变，以便在个案研究中进行比较。为了提供一个广泛且公允的比较，我们的TCO模型分析框架：

- 提供了美国、中国、及欧洲*三个地区的不同情景分析
- 提供了历史数据（过去3年）及未来预测（未来10年）
- TCO分析框架中没有将各个地区的补贴计算在内（车辆购买、基础设施、及燃料补贴均没有考虑），但在本节案例分析部分，我们将补贴包含在了特定的案例应用中
- 假设整车生产商的毛利率恒定，由于燃料电池车及纯电动车的规模小于燃油车，我们为燃料电池车及纯电动车增加了由于缺乏规模效益而造成的额外成本。这一假设是基于我们和整车和零件生产商进行的深度访谈。除了动力系统，车辆的其他组件（如底盘、车身、座椅等）在燃料电池车、电动车及燃油车中是相似的，但在尺寸上有微小变化，这导致可能需要不同的模具来制造，使得单个部件价格可能相差数百倍。一辆车的组成零部件可能有数千个，因此很难确定哪些部件是相同的，哪些部件是相似，但需要进行微小修改的，同时不同整车厂商及客户可能也会对各个零部件有个性化需求。当从整车的制造及零售角度考虑的时候，可以发现燃料电池车及电动车由于生产数量有限，零部件缺乏规模效应，而造成整车的制造成本显著高于燃油车。因此我们假设当前燃油车已经实现完全的规模效应，将燃油车的制造成本作为比较基准，假设未来10年内，燃料电池车除动力系统外的其他零部件可以实现完全规模效应。

注释：*由于每个国家和地区都覆盖了很广的区域，各个国家及国家内部不同省份、城市之间也有较大的差异性，我们尽量采用各个国家及地区的平均值；欧洲的数据为西欧地区的平均值；但我们无法将数据精确至欧洲各个国家、美国各个州或中国的各个省

图23：TCO模型分析框架

		燃料电池车	纯电动车	燃油车
购买成本	毛利	• 在制造成本基础上的增量成本	• 在制造成本基础上的增量成本	• 在制造成本基础上的增量成本
	零部件成本加成	• 由于缺乏规模效益，非动力系统部件和燃油车相比多出的额外成本加成	• 由于缺乏规模效益，非动力系统部件和燃油 • 车相比多出的额外成本加成	• 无，已实现完全规模效益
	动力机	• 电动机及相关组件	• 电动机及相关组件	• 内燃机
	储能组	• 氢罐 • 燃料电池系统 • 电池（约为电动车的电池容量的十分一）	• 电池 • 电池管理系统	• 油箱
	其他零部件	• 车辆的其他零部件，如底盘、车身、电子系统等，详细组成在第二节中已列示		
运营成本	燃料费用	• 氢气价格X百公里耗氢量	• 电价X百公里耗电量	• 油价X百公里耗油量
	基础设施	• 加氢站	• 充电站及相关设施	• 假设加油站成本已经体现在油价中
	维修费用	• 日常维护成本	• 日常维护成本	• 日常维护成本
	零部件替换	• 燃料电池系统替换成本 • 电池替换成本	• 电池替换成本	• 内燃机替换成本
	其他	• 保险及其他费用		

图23提供了TCO模型的分析框架，为了方便对不同车型进行对比，我们选择12米长的公交车作为研究对象，公交车车队规模为100辆，每辆车日均行驶200公里。总拥有成本由购买成本及运营成本构成。在购买成本中包含了毛利、动力系统及其他组建模块。对于燃料电池车及电动车，我们额外增加了由于缺乏规模效益而造成的成本加成。运营成本主要由燃料费用、基础设施成本、维修成本、重要零部件替换成本及保险费用等构成。在这个TCO模型中我们假设运营者需要承担加氢站建设成本（实际运营中加氢站应当会由其他相关方建造，车队运营者可能不需要承担加氢站成本）。同样，我们假设纯电动车需要在终点站建造专属充电站及在站点间建造部分临时充电桩。

3.1.1 美国TCO分析结果

我们首先对燃料电池车在美国的TCO进行分析，在之后的章节中进一步分析燃料电池车在中国和欧洲地区的TCO。

当根据刚刚提到的框架对当前燃料电池车在美国的TCO成本进行测算，我们可以看到与纯电动车与燃油车相比，燃料电池车的TCO更高，由于三种车型的发展阶段不同，这一结果并不难以理解。如图24所示，当前燃料电池车的TCO约为243美元每百公里，而纯电动车及燃油车则分别为166美元及125美元每百公里。

图25对2019年车辆购买成本进行了拆分。

如图表所示，不同车型之间购买的成本的主要差异在于储能组。当前燃料电池系统价格仍较高，每千瓦约1,500美元，燃料电池系统成本约为整个储能组的73%，占整体燃料电池车成本的13%。除了燃料电池系统，储氢罐的成本也较高，为整个储能组成本的15%。燃料电池系统及氢气罐的较高的价格是导致燃料电池车的购买成本高于其他车型的主要原因之一。但随着技术的成熟，零部件成本将持续降低，我们也在后面的表格进行了进一步的预测。

除了储能组，零部件成本加成也在燃料电池车及纯电动车的购买成本占比较高。但正如我们之前所预料的那样，纯电动车的零部件成本加成要低于燃料电池车，这是由于纯电动车更早的实现了商业化，生产规模也相对较大。根据我们的专家访谈，专家们的共识是燃料电池车在未来10年内将实现完全的规模效益，因此我们预计燃料电池车这部分成本加成将在未来10年内降低至0。

图24：2019美国公交车TCO（单位：美元/每百公里 ）

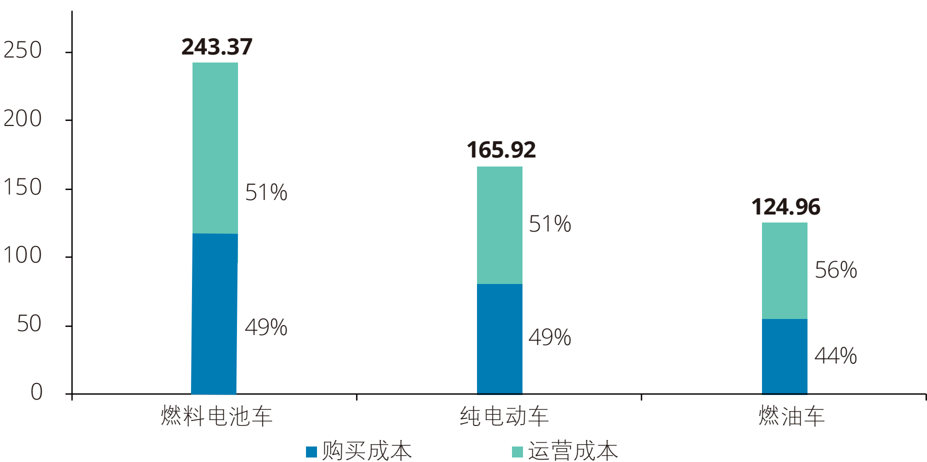


图25：2019美国公交车购买成本拆分（单位：千美元/每车）

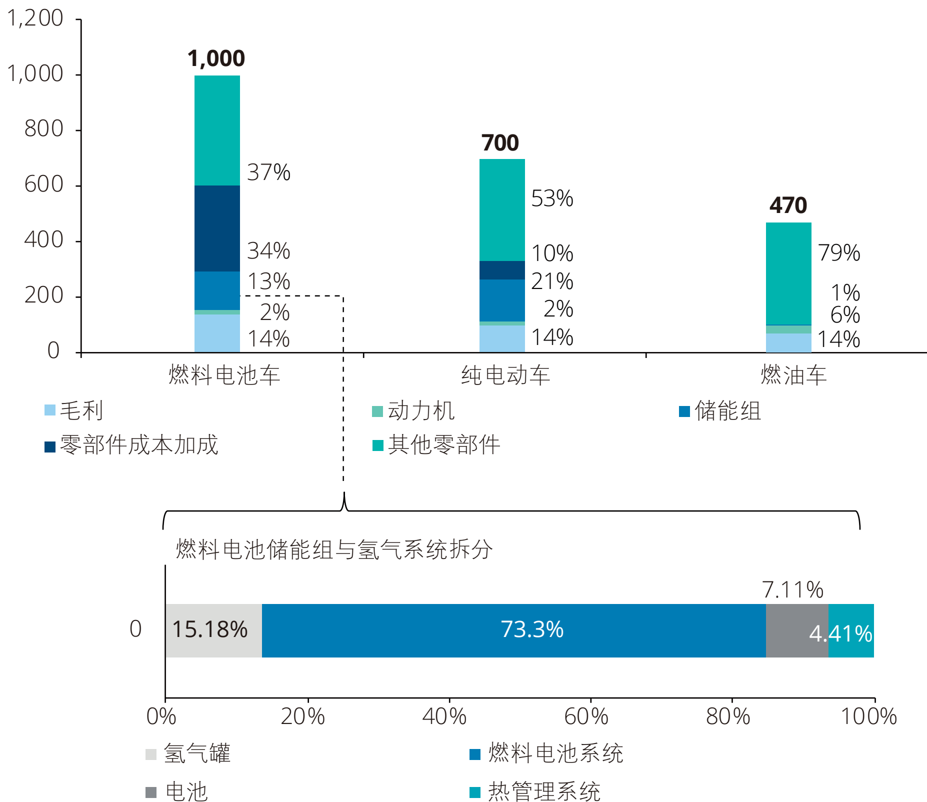


图26对氢燃料公交车的运营成本进行了拆分。

由于氢气价格较高，燃料成本在燃料电池车的运营成本占比较高，而由于电费较低，纯电动车的燃料成本在运营成本中占比较低（较低的燃料费用正是纯电动车的卖点之一）。和燃油车相比，电动车（包括燃料电池车及纯电动车）的维修费用更低，因为在电机驱动下，车辆的日常维修项目更少，更换周期更长。但燃料电池车的燃料电池系统替换及纯电动车的电池替换则增加了额外的成本。燃料电池系统当前使用寿命约25,000小时，而由于电池容量衰减，商用车电池组通常需要每5年更换一次。但随着新能源车技术的成熟，可以预期这些重要零部件替换成本可以迅速降低，我们也将在之后的趋势预测图表中看到这一点。

对燃料电池车及纯电动车来说，加氢站及充电站的建造成本也是运营成本的重要组成。例如在我们的TCO研究框架中，公交车运营车队的规模约为100辆，而建造一个可以满足这样规模车队的加氢需求的加氢站费用大约为600-700万美元。同样充电站建设成本对大规模运营的车队而言也较高，不仅包括充电桩硬件成本，甚至需要电网及变电站改造。而对公交车车队，以防运营中出现没电的情况，在站点间设置部分机会充电站，也是非常必要的。当然，基础设施成本与运营模式联系也非常紧密，不同运营模式下，基础设施成本也会有显著差异。在我们的TCO模型中，我们主要是为读者提供一个说明性的思考角度。同样值得注意的是，对于燃料电池车而言，加氢站建设成本预计将会快速下降。

图26：2019美国公交车运营成本拆分（单位：美元/每百公里）

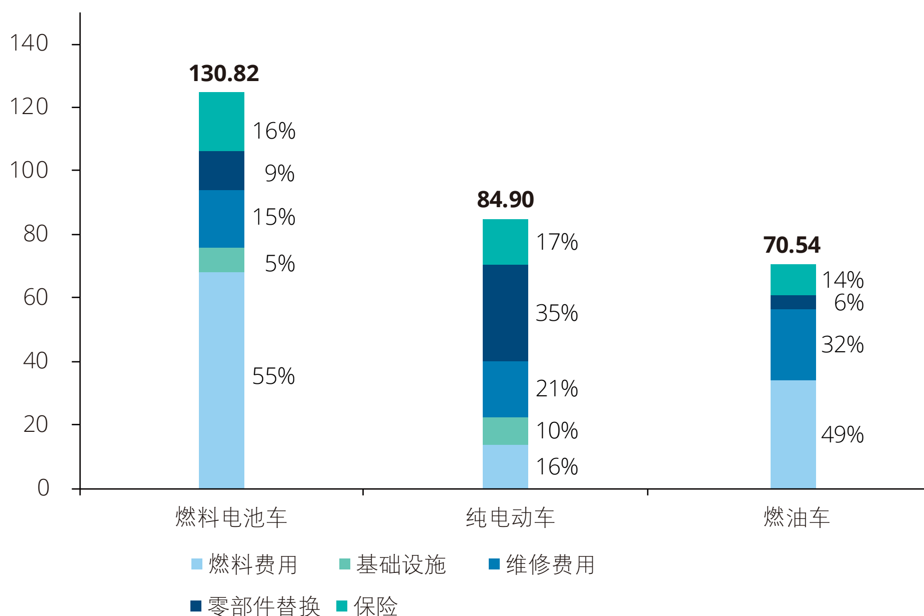


图27：美国公交车TCO展望（单位：美元/每百公里）

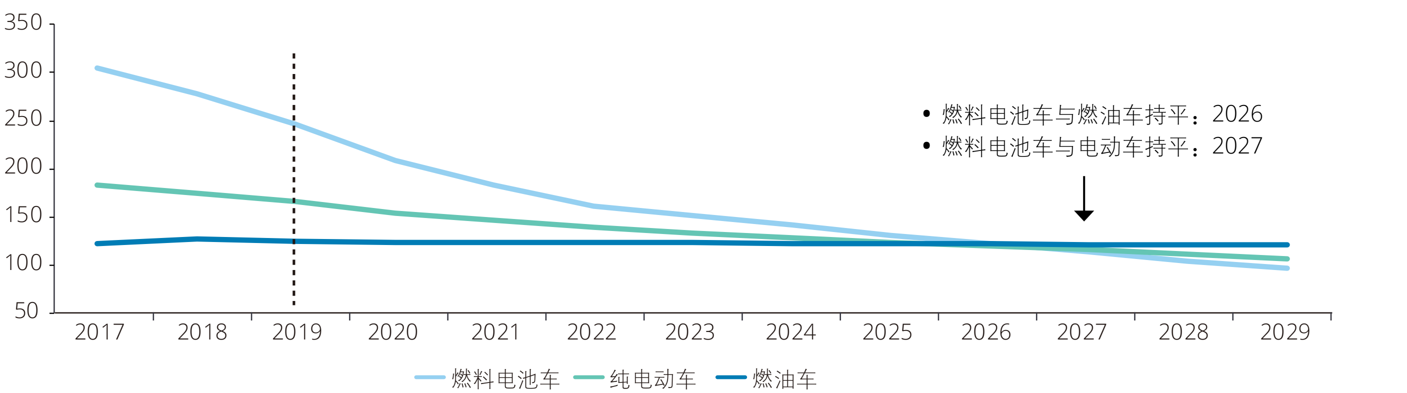


图27为我们TCO模型对未来10年美国公交车TCO的预测结果。

为了保持模型的完整性，我们不仅对燃料电池车及电动车进行了TCO预测，也对燃油车进行了未来10的TCO预测。在对未来车型的TCO预测中，我们仍是以应用了自下而上的方法搭建模型，并且对内燃机采取较为保守的假设，保持其成本相对稳定。然而在实际运营中，情况可能并非如此，仍有很多无法在TCO中被量化的因素会对未来燃油车的的使用有较大影响。比如对燃油车不断收紧的排放标准会导致燃油车的发动机及尾气净化装置成本的不断提升；同时一些政策限制也会对车队运营者的车型选择造成影响，如禁止燃油车进入城市区域，及我们在第二节中提到的，很多国家已经发布了计划将在2030-2050年左右禁止燃油车上路。

根据我们的模型预测，燃料电池车的TCO预计将在2026年左右开始低于燃油车，并在2027年左右开始低于纯电动车。根据模型测算，燃料电池车的TCO预计将在未来10年降低超过50%。



图28：美国氢燃料公交车购买成本预测（单位：千美元）

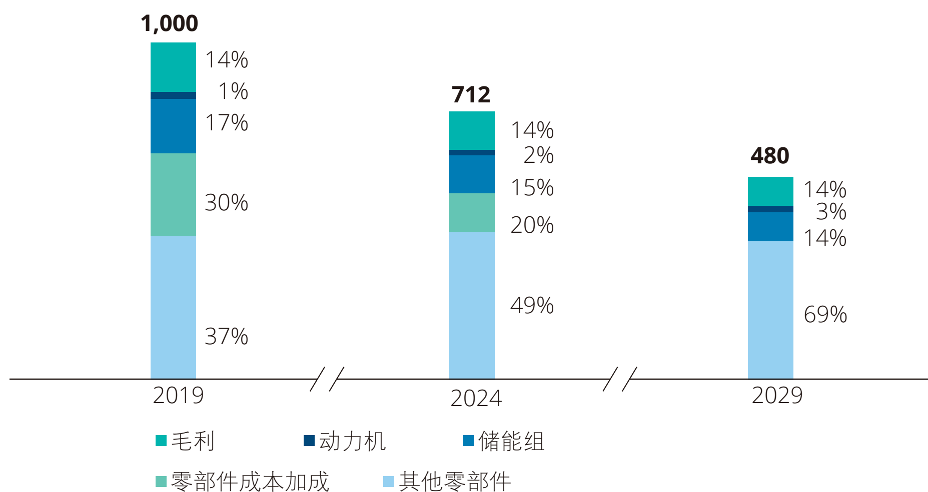
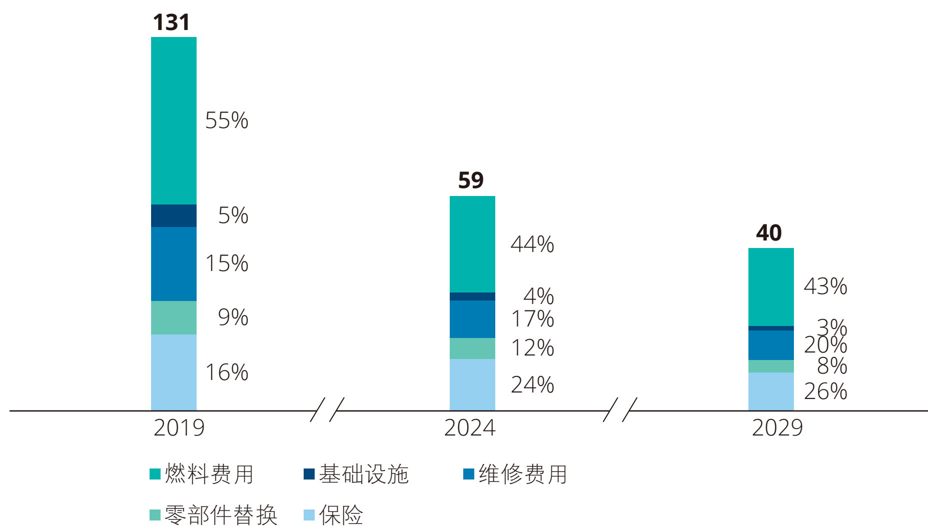


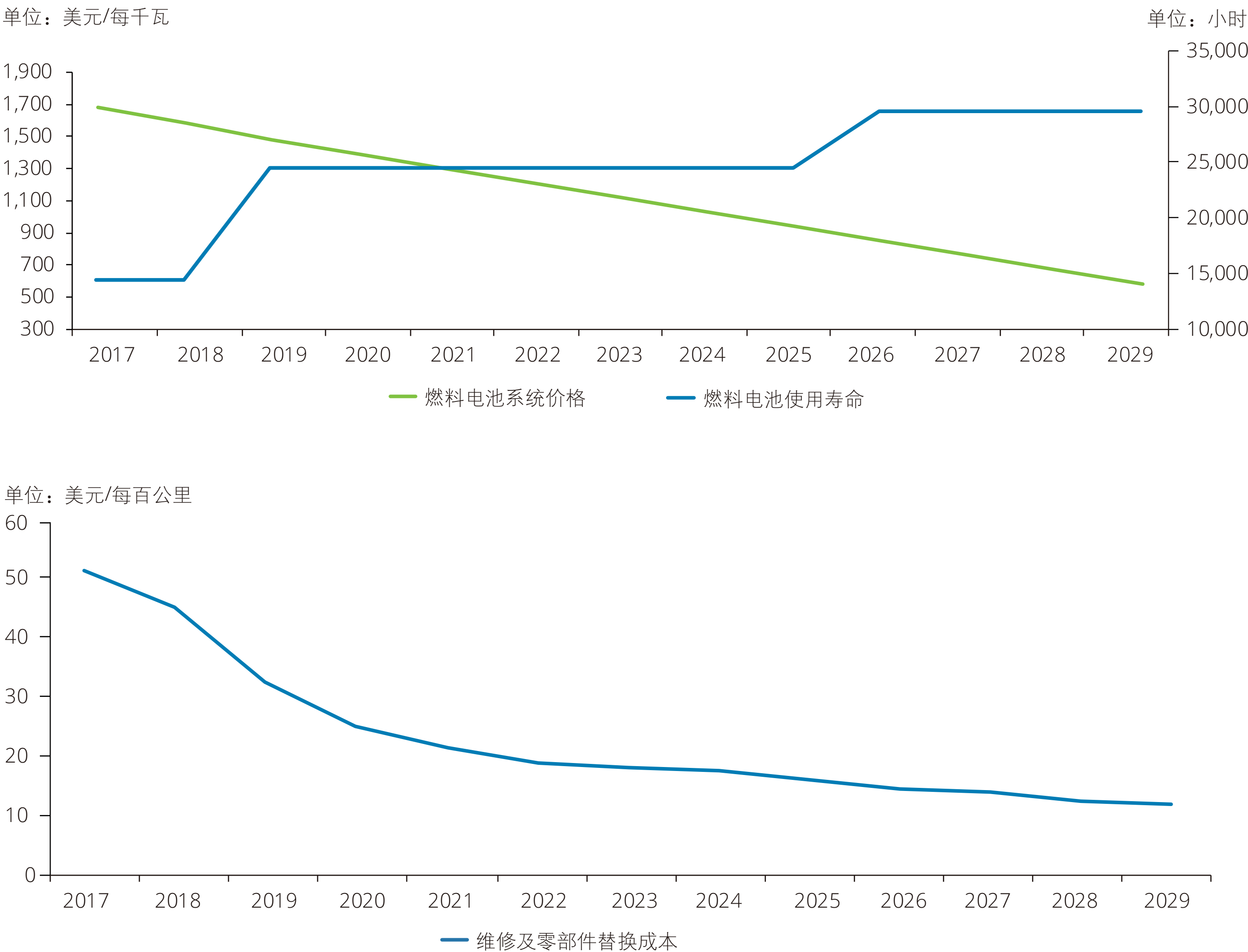
图29：美国氢燃料公交车运营成本预测（美元/每百公里）



燃料电池车的TCO在前5年的下降尤为明显，正如图28及图29所示，TCO下降主要由以下几个因素驱动：

- 燃料电池系统的价格下降使得购买成本下降及运营中的零部件替换成本下降
- 氢气价格下降使得燃料费用下降
- 加氢站建造成本下降

图30：燃料电池系统价格及使用寿命、维修费用及零部件替换成本预测



尽管燃料电池车的TCO下降是由多个因素决定的，但我们仍从中识别出了对燃料电池车TCO下降最重要的几个关键驱动因素-燃料电池系统、氢气价格、及加氢站成本。

图30对未来燃料电系统的价格预测进行了说明，根据燃料电池制造商的数据，预计未来燃料电池系统的价格将从现在的1,500美元每千瓦下降到2029年的约600美元每千瓦[166]。我们在第4节也提到了燃料电池的材料并不是其主要成本，高技术门槛带来的高制造成本才是当前燃料电池价格较高的原因。随着未来技术的持续提升及生产规模的不断扩大，燃料电池的制造成本有巨大的下降空间。

除了价格下降，燃料电池系统的寿命也预计将会进一步延长。当前燃料电池系统的使用寿命约为25,000小时，预计到2026年使用寿命将达到30,000小时。

燃料电池系统价格不仅与车辆购买高度相关，同时也会影响到运营成本中的零部件替换成本。 预计燃料电池车的维修及零部件替换成本将在未来10年下降约60%。

图31：美国氢气价格预测 （单位：美元/每千克）

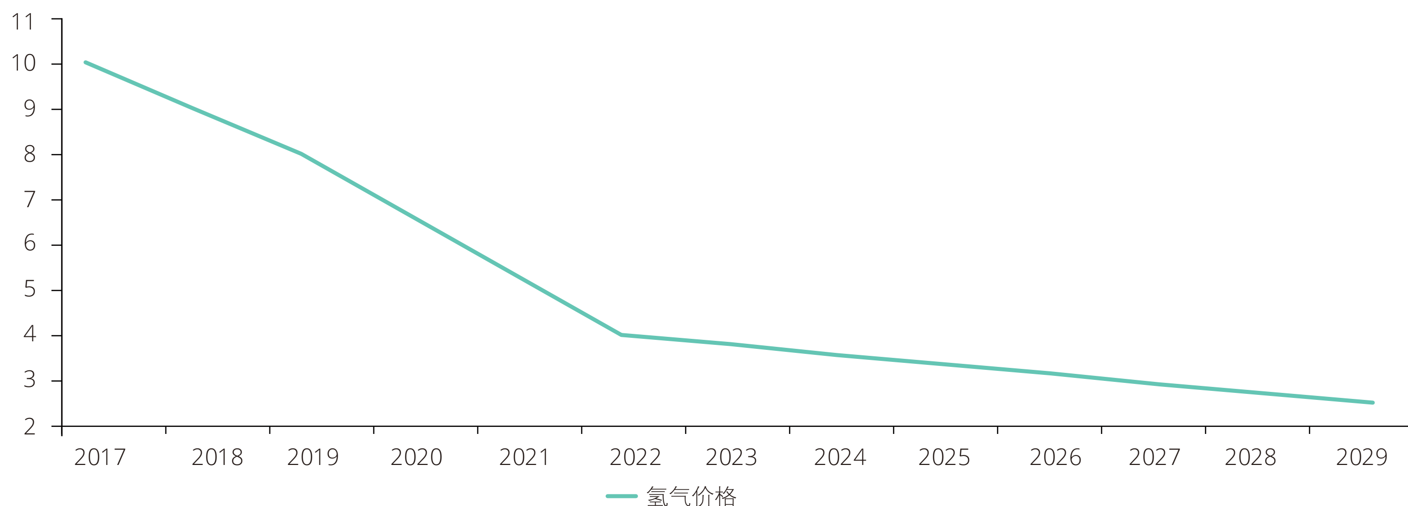
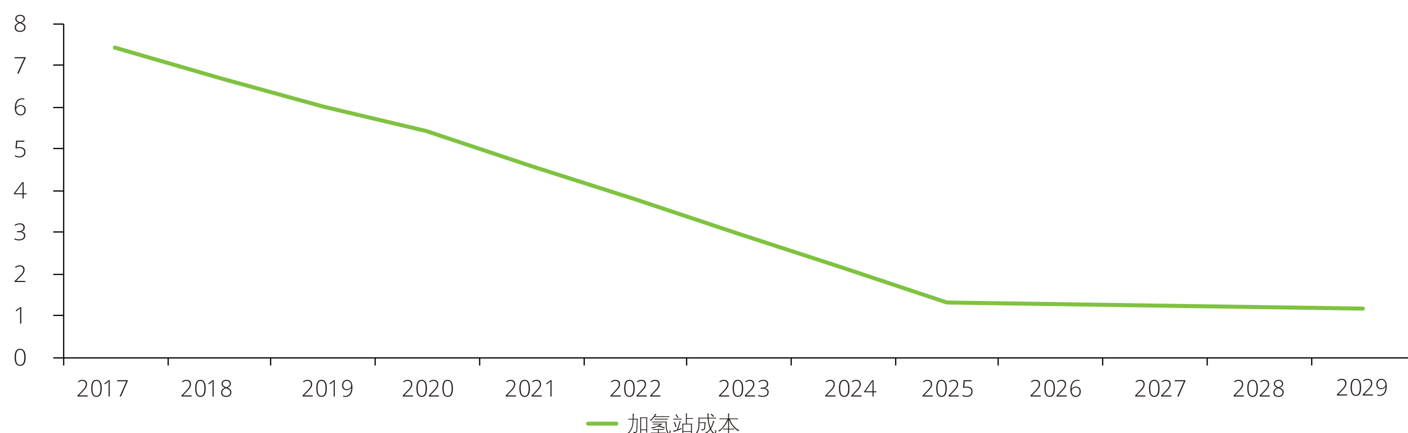


图32：美国加氢站成本预测 （单位：美元/每车每百公里）



氢气燃料成本及加氢站成本在燃料电池车的TCO中重要组成，这两项合计在2019年的运营成本合计占比约50%。

当前，由于氢气价格较高，当前燃料电池车的燃料成本要显著高于纯电动车及燃油车。由于氢气密度较低，氢燃料的运输及存储成本较高。随着存储及运输技术的提高，及氢气生产的规模化，预计到2029年氢气价格下降至低于现在的一半[167]（图31）。

加氢站成本对于氢燃料公交车运营来说也是一笔较高的额外成本。当前平均每车每百公里需要承担约6美元的加氢站成本。预计随着燃料电池车的普及，加氢站网络将逐渐完善，预计2029年每车每百公里承担的加氢站成本将下降至2美元（图32）。

3.1.2 中国TCO分析结果

图33-35为中国公交车的TCO分析结果，2019年中国氢燃料公交车单车的TCO约为178美元每百公里，纯电动及燃油公交车的TCO分别为101美元及74美元每百公里。与美国公交车的TCO情况相比，由于动力系统外的其他零部件成本较低，中国公交车总体购买成本较低，而动力系统相关的零部件成本在中国公交车成本整体占比提升。而由于中国氢气价格相较美国氢气价格较高，中国燃料电池车的整体运营成本稍高于美国燃料电池车，约为123美元每百公里。

相较于2017年，当前中国燃料电池车的TCO已经下降了32%。到2029年，我们预计中国氢燃料公交车的TCO将下降至55美元每百公里，低于纯电动及燃油公交车的TCO。燃料电池系统及氢气价格下是驱动中国氢燃料公交车TCO下降的主要原因。我们预计中国的燃料电池系统价格将在未来10年下降70%。正如我们前面提到的，燃料电池系统价格下降不仅降低了氢燃料公交车的购买成本，也会有助于减少运营成本中的零部件替换成本。随着加氢站数量的增加及氢气生产技术的提高，预计中国氢气价格将在未来10年内降低63%，同时加氢站的成本也将持续下降，当前这两项成本在运营成本中占比约60%，在TCO中占比约40%，氢气价格及加氢站的成本的降低将帮助燃料电池车的TCO大幅降低。

总体来说，预计中国氢燃料公交车的TCO将在2027年低于燃油车，这比美国稍落后了一年。而相较于美国，中国当前电动车的购买成本较低，加之较低的电费使得电动车运营成本较低，使得相较于美国，当前中国的电动公交车TCO与燃油车TCO之间的差距较小。所以根据模型测算，氢燃料公交车的TCO将在2028年低于纯电动公交车，这比美国的情况要稍晚一些。

图 33：2019年中国公交车购买成本拆分（单位：千美元/每车）

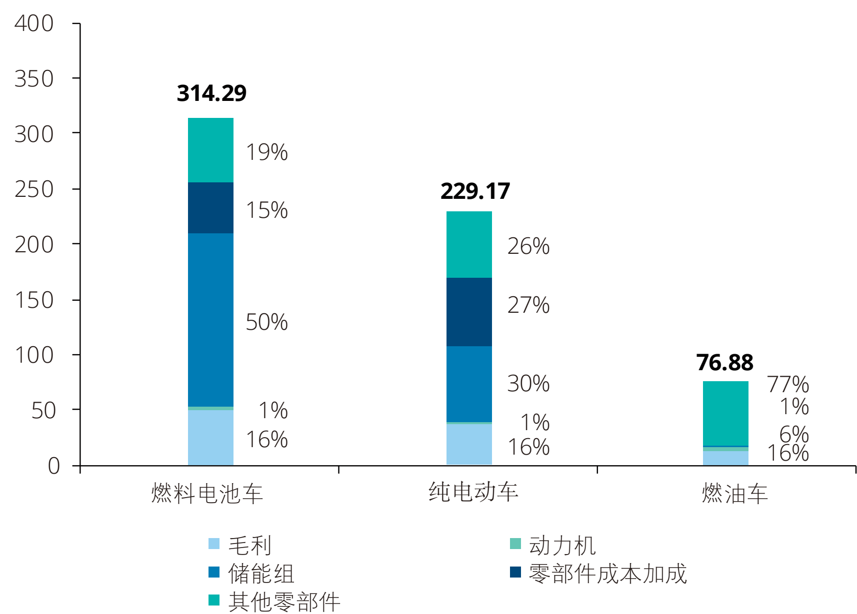


图 34：2019年中国公交车运营成本拆分 （单位：美元/每百公里）

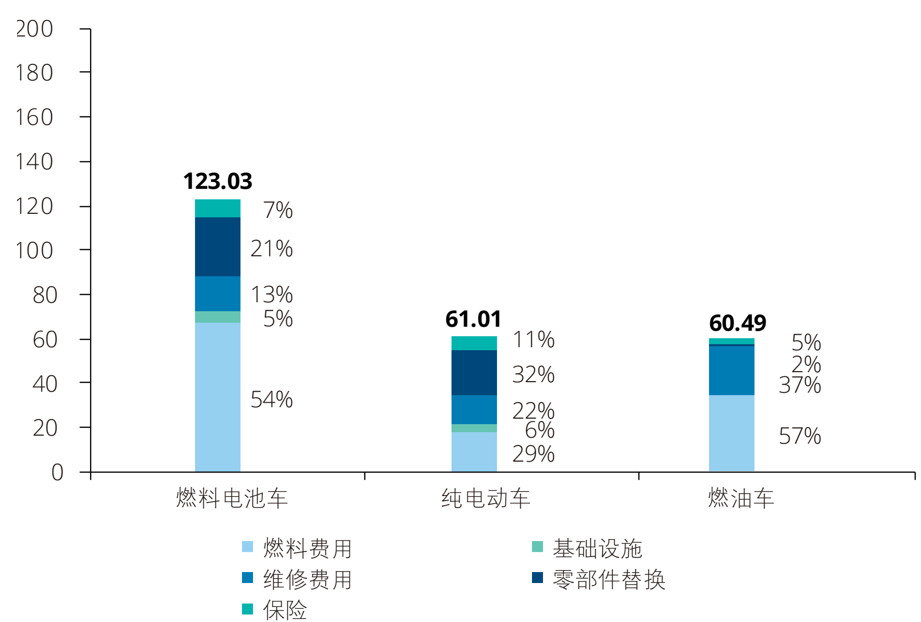
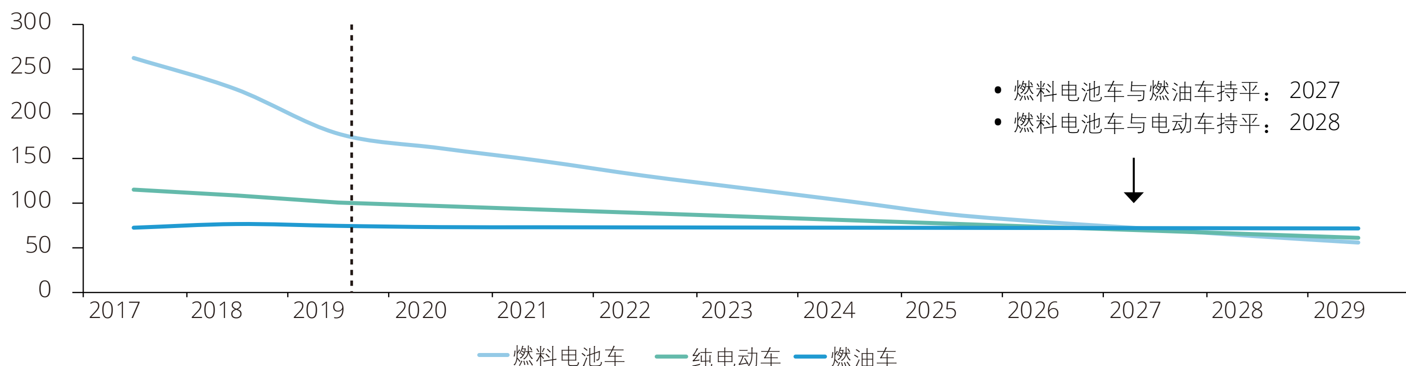


图 35：中国公交车TCO预测



3.1.3 欧洲TCO分析结果

图36-38为欧洲公交车的TCO分析结果，相较于美国及中国的应用情况，燃料电池车的TCO预计在欧洲将会更快的下降。2019年欧洲氢燃料公交车的TCO约为190美元每百公里，电动及燃油公交车的TCO分别为150美元及124美元每百公里。我们预计氢燃料公交车的TCO将在2023年降低至124美元每百公里，并开始低于纯电动公交车TCO；预计到2024年氢燃料公交车的TCO将降低至116美元每百公里，并开始低于燃油车的TCO。

相较于美国，欧洲公交车的整体购买成本较低，一是由于欧洲公交车的保修期低于美国，二是由于欧洲对公交车进口限制不多，如欧洲有很多从中国整车厂商中购买的公交车，价格相对较低。预计欧洲燃料电池系统的价格将在未来10年下降60%，氢气及加氢站成本预计也将快速下降，氢气价格预计在未来10年将下降44%。此外，部分欧洲国家如英国，已经对燃油车加征了额外的路税，因此预计在这些国家，氢燃料公交车及电动公交车的TCO将会更快的低于燃油车。

图 36：2019年欧洲公交车购买成本拆分（单位：千美元/每车）

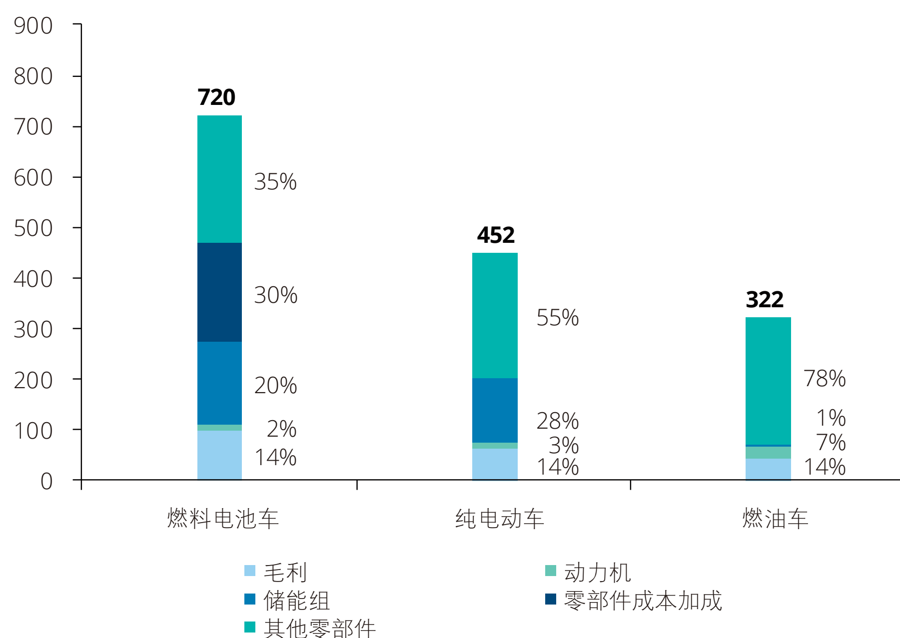


图 37：2019年欧洲公交车运营成本拆分 （单位：美元/每百公里）

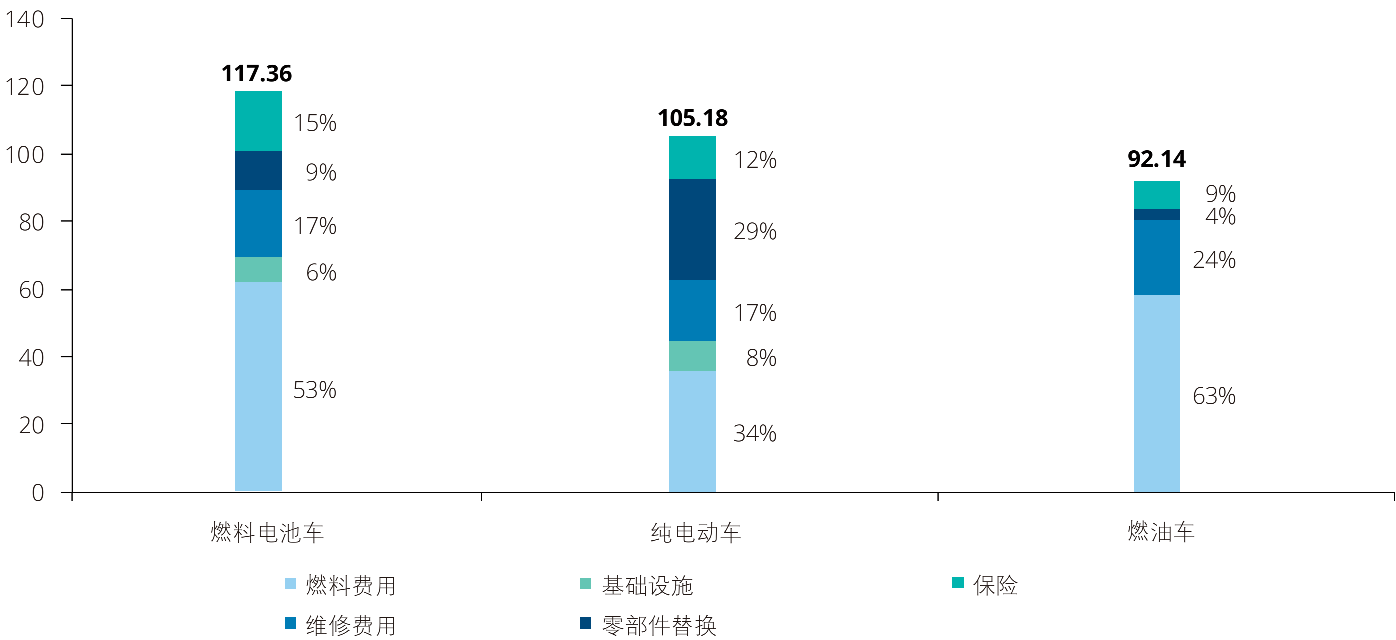


图 38：欧洲公交车TCO预测

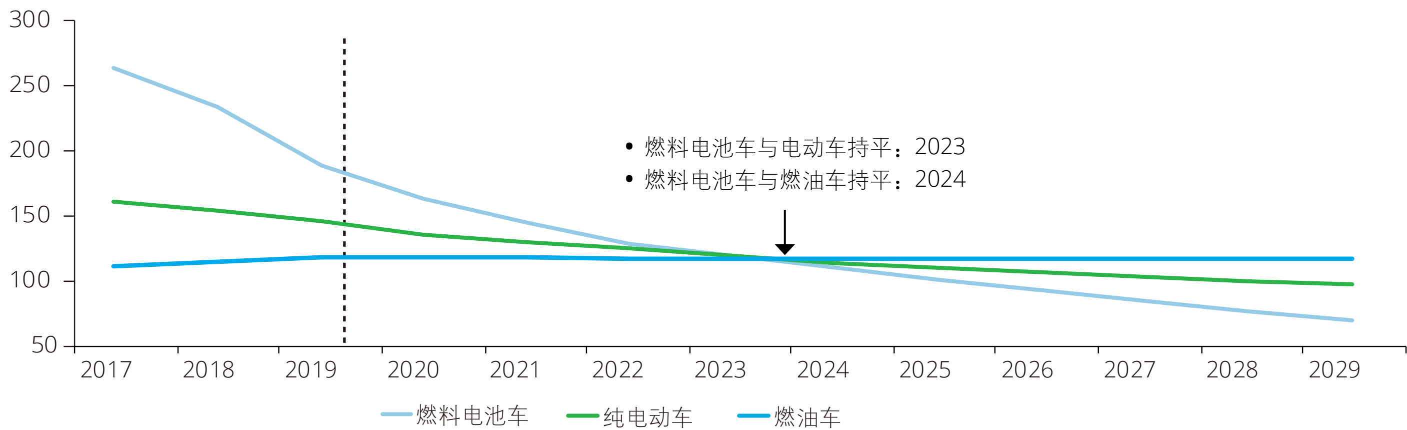


图39：2019年燃料电池车TCO对比 （单位：美元/每百公里）

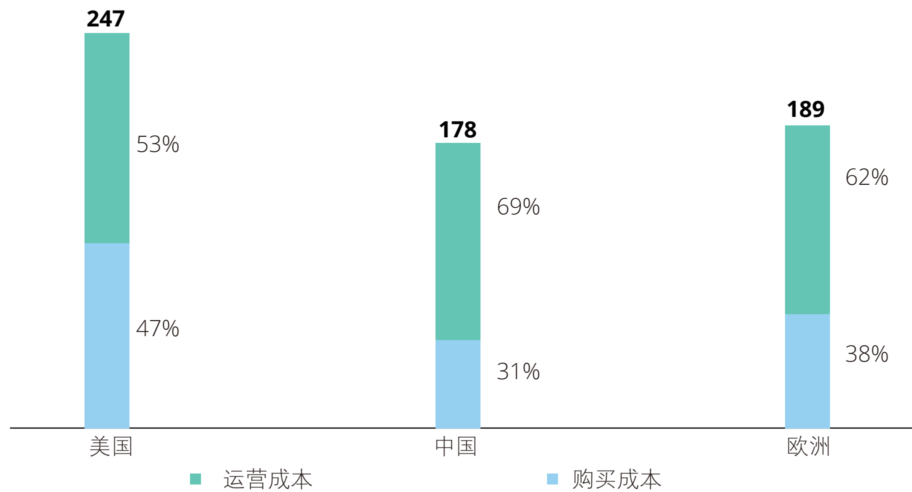


图40：2019年燃料电池车购买成本对比 （单位：千美元/每车）

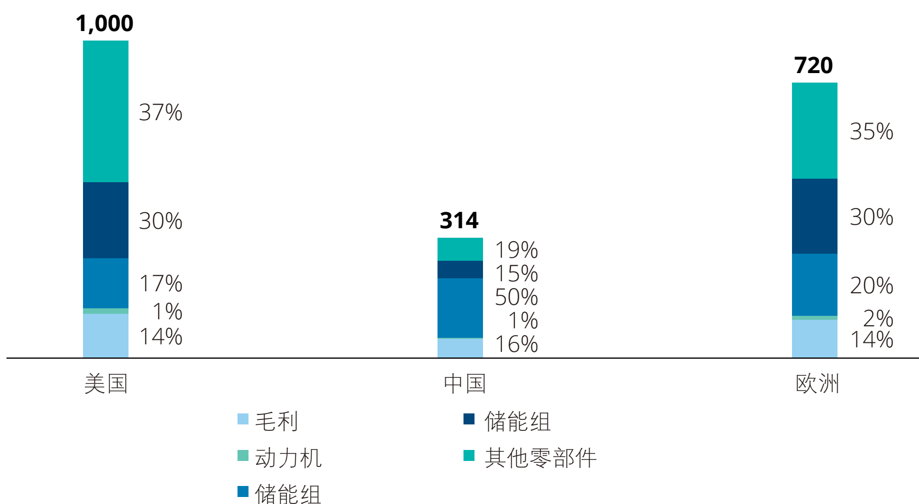
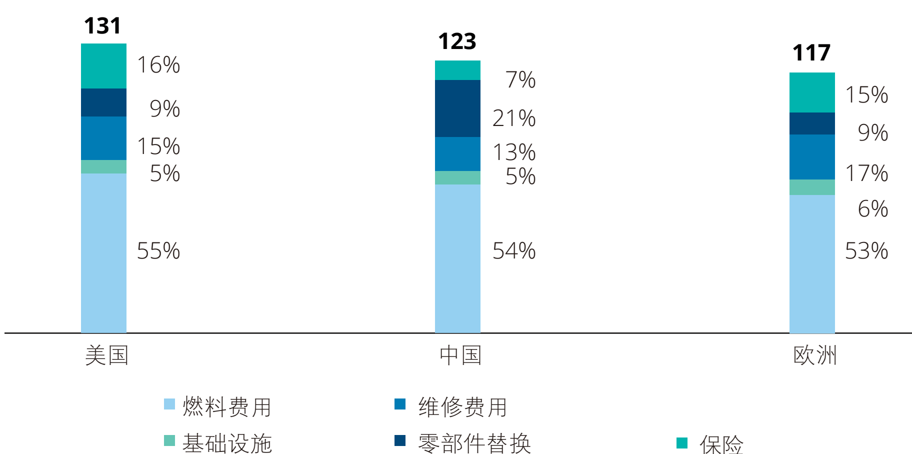


图41：2019年燃料电池车运营成本对比 （单位：美元/每百公里）



3.1.4 不同国家及地区燃料电池车TCO分析结果对比

尽管燃料电池车TCO的整体下降趋势在三个国家及地区是类似的，但由于主要成本项的价格不同，导致了2019年燃料电池车TCO结构及未来TCO下降速度有所差异。虽然我们已经对各个国家及地区的TCO情况清楚的解释三个国家及地区燃料电池车的结构差异，我们将三个国家及地区2019年燃料电池在前文进行了详细的说明，但为了更加车TCO情况通过图39-41进行了对比。

在2019年中国氢燃料公交车TCO是最低的，主要受益于较低制造成本降低了购买价格。在运营成本方面，由于氢气价格及零部件替换成本（燃料电池系统）较低，欧洲氢燃料公交车运营成本最低。中美以及欧洲的总体运营成本相近，但结构有所不同，中国的零部件替换成本相对较高，但较低的加氢站成本及因为车价低而较低的保险费用缩小了中国与欧洲运营成本方面的差距。

由于零部件、劳动力成本较低，且车辆寿命较短，中国公交车的购买成本在三个国家及地区中最低。而由于美国公交车保修期较长，并且美国政府通过“购买美国货”战略鼓励购买本土整车厂商的产品，使得美国的氢燃料公交车成本在三个国家及地区是最高的。

从运营角度来看，三个国家及地区不同的氢气成本是导致运营成本差异的最重要原因。此外加氢站成本在不同地区也有所不同。如在中国加氢站硬件成本较低使得加氢站成本整体较低。

除了关键成本项的价格区别，不同地区的车辆使用年限也不同。美国及欧洲的公交车运行年限一般为12-16年，而中国公交车一般运行8年就需要报废。车辆寿命的不同对百公里购买成本及零部件替换成本影响较大，使得TCO未来变动曲线有所不同。

图42中的关键成本项对比是为了给不同区域车辆的TCO差异提供一个对比示例，显然不同省市、不同运营模式及不同车辆类型也会对TCO造成较大影响。在本文中，我们将使用3个燃料电池车案例分析，来示例TCO模型如何应用到实际运营中。

图42：2019年燃料电池公交车关键成本项对比

		美国	中国	欧洲
购买成本（千美元）	氢燃料公交车	• 1,000	• 314	• 720
	电动公交车	• 700	• 229	• 452
	燃油公交车	• 470	• 77	• 322
燃料电池系统（美元/每千瓦）		• 1,500	• 2,000	• 1,200
燃料价格（美元/每单位）	氢气 (kg)	• 8	• 8.4	• 7
	电 (kwh)	• 0.11	• 0.14	• 0.18
	柴油 (L)	• 0.76	• 0.96	• 1.62
车队所需基础设施（千美元）	加氢站	• 6,500	• 6,400	• 8,000
	充电站 (BEV)	• 12,500	• 5,200	• 12,500
车辆寿命（年）		• 12	• 8	• 14



案例分析1——物流车

氢车熟路成立于2017年7月，是中国的一家新兴初创企业，专注于燃料电池物流车市场。图43展示了氢车熟路创立以来的里程碑。尽管成立时间不长，但该公司已是全球最大的燃料电池物流车辆运营商之一[169]。

该公司于2017年成立时，中国的氢能源市场尚未很好地建立，氢燃料电池车价格高昂，加氢站数量极少。但是，氢车熟路坚信燃料电池车是物流的未来[172]，尤其是在人工智能和大数据驱动的集中运营的情况下。为此，氢车熟路的创始人通过向东风集团购买了500辆燃料电池物流车*，大胆地进入了市场[173]。

氢车熟路专注于建立行业联盟以促进氢燃料电池车的更大规模应用[169]。氢车熟路的原始股东是燃料电池车产业链中的主要参与者，包括中国领先的燃料电池系统公司重塑科技[170]以及拥有储氢和氢气运输技术的上市公司富瑞特装[171]。2018年，氢车熟路引入了另一家制氢业公司-法国巨头液化空气集团和私募基金公司春阳资本作为股东[174]。该公司保持其发展势头，计划2019年在深圳地区推出另外600辆燃料电池车[175]，并计划在2020年之前投入2,000-3,000辆燃料电池车[126]。

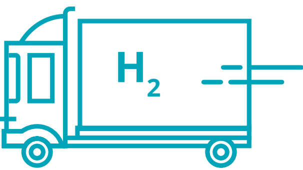
在案例分析中，我们使用了具有类似性能的物流卡车作为分析对象。详细的参数对比如下图44所示。

图43. 氢车熟路发展里程碑



注释：业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。
*这500辆燃料电池车长6.4米，载货空间15立方米，承载能力3.2吨；每辆车的氢气容量为10公斤，续航里程为400公里[173]。

图44. 物流车辆参数对比



燃料电池物流车 [176]

- 电机性能：55 kw （约75匹马力）
- 燃料电池系统性能：30 kw
- 载荷能力：3.2 吨
- 续航里程：超过305公里
- 车辆长度：6.4米



电动物流车 [177]

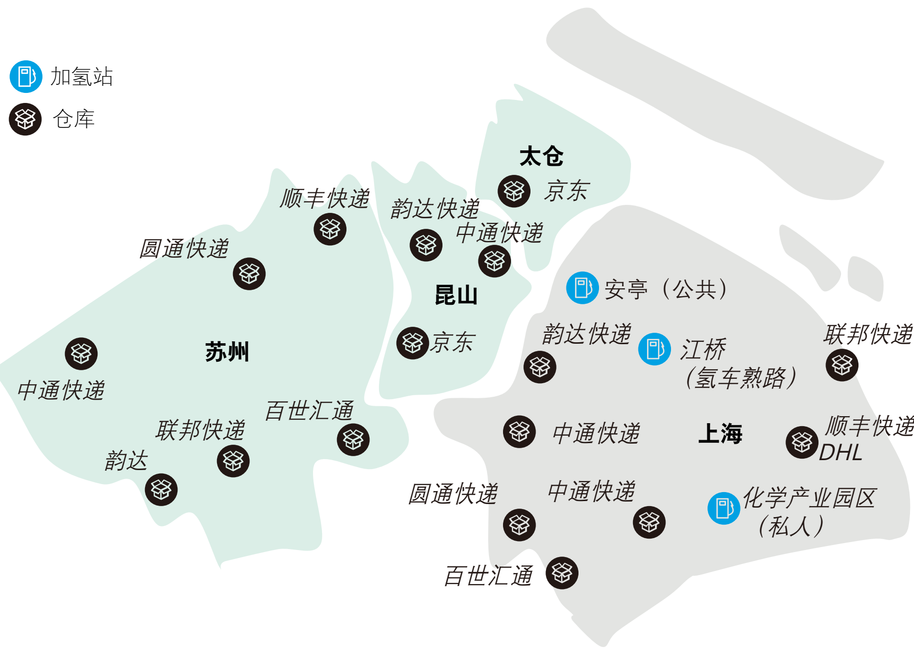
- 电机性能：120kw（约163匹马力）
- 电池性能：100 kwh
- 载荷能力：约3吨
- 续航里程：约200公里
- 车辆长度：5.97米



燃油物流车

- 内燃机性能：100kw左右 [179]
- 载荷能力：约3吨 [178]
- 续航里程：约400公里
- 车辆长度：5.9米 [179]

图45： 2019位于上海的在运营加氢站



上海是中国领先的燃料电池应用城市之一。目前上海有三个加氢站，分别位于嘉定、奉贤和江桥，如图45所示。此外，随着上海继续扩建其加氢基础设施，有13个加氢站正在选址阶段[180]。作为周边地区重要的物流枢纽，一大批物流企业围绕这一地区建立了物流中心和仓储网络。一套完整的加氢基础设施网络将有助于推动城市向绿色交通解决方案发展。

从图中可以看出，氢车熟路在2017年建造的加氢站处在另外两个现有加氢站中间的战略位置 [181]。

注释： 业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。
配送中心和仓库为不完全统计，仅供参考；所有大型物流公司都有许多小型仓库分布在上海各地，通常分布在每个地区的多个地点

图46：氢车熟路商业模式 [169]

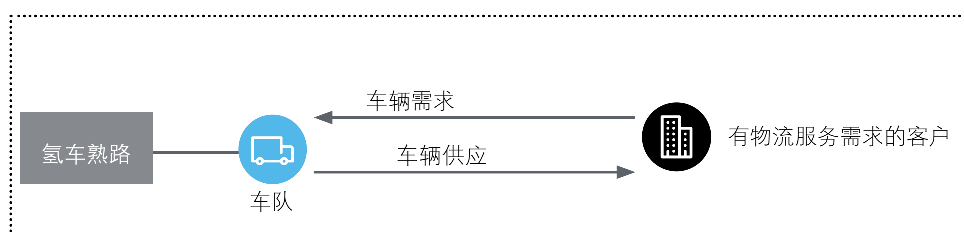
1. 自营模式

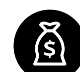



费用情况

- 行业内一般收费是300-350元人民币（约合43- 50美元），根据距离和货物重量而定。

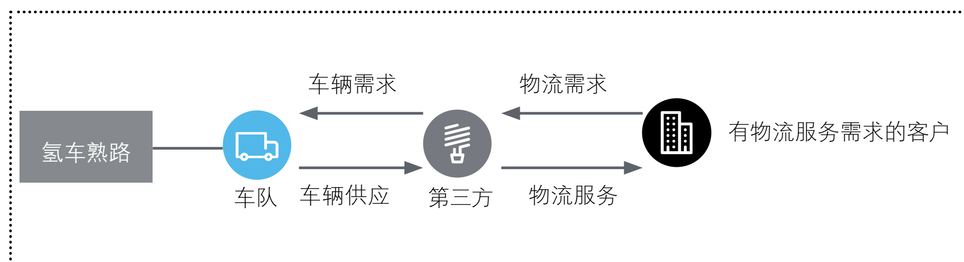
2. 直接租赁




费用情况

- 行业内对有物流需求的客户按每月每辆车收费5,000-6,000元人民币 (约合710- 860美元) 。

3. 间接租赁




费用情况

- 行业内每月向第三方物流供应商收取5,000-6,000元人民币 (约合710- 860美元) ，然后由第三方物流供应商为终端客户提供服务。

由于氢车熟路的业务还处于起步阶段，所以氢车熟路在商业模式上尽量保持灵活性，以吸引更多的客户，包括京东、阿里巴巴、申通物流、宜家等[172]。总的来说，氢车熟路的商业模式可以分为三种类型：自营物流、直接租赁和间接租赁（图46）。我方在这三种模式中做下列的收入模式假设：

在第一种模式中，氢车熟路承担所有与为客户运输货物相关的成本，包括车辆，以及驾驶员和燃料成本等运营成本。客户为每笔订单向车队运营者支付300-350元人民币（约合43-50美元）的固定费用，具体价格取决于旅行距离和装载量。

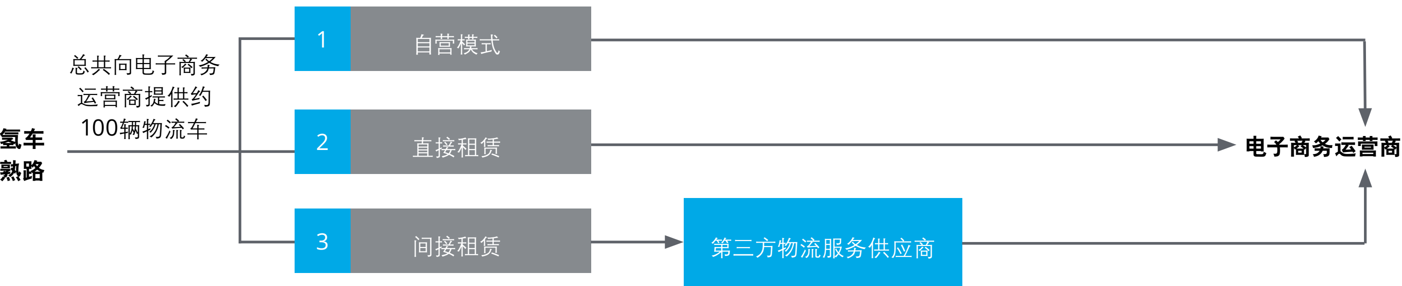
第二种模式是直接租赁，氢车熟路将燃料电池车直接租赁给有物流需求的客户。在这种模式下，行业内每月每辆车一般收取5,000-6,000元（710- 860美元）。客户配备司机，自行完成送货。客户还承担日常运营成本（即司机工资和燃料成本），但氢车熟路为客户提供燃料补贴，确保客户承担的氢燃料成本与每百公里柴油成本持平。此外氢车熟路还为车队支付维修和保险费用.

第三种模式是间接租赁，从氢车熟路的角度来看，与第二种情况基本相同。唯一不同的是，氢车熟路将车辆租给第三方物流供应商，然后由第三方物流供应商为最终客户提供物流服务。

在这三种商业模式中，运营者保持与电动车和燃油车辆的市场价格一致，以建立市场占有率和认知度。客户把成本和服务质量放在首位。虽然京东等大客户会考虑社会和环境效益来选择燃料电池车，但这通常不足以抵消成本的增加。因此，氢车熟路选择自己承担燃料电池车的附加成本，而不是在公司现阶段将其转嫁给客户。

注释： 业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。

图47：氢车熟路向电商运营商提供的商业模式假设 [169]



以上三种商业模式可以通过假设的氢车熟路为某电子商务运营商提供服务的场景来说明（图47）。该电子商务运营商也有灵活的商业模式，一方面为其他卖家提供电商平台，另一方面也通过自营的电商商城和自有仓库销售部分商品。

基于目前收入和成本构成的假设，我们根据上述商业模式中的自营和租赁模式，计算了氢车熟路每运营100公里的TCO和毛利率。从氢车熟路财务的角度来看，租赁给终端客户或租赁给第三方物流供应商是相同的。模型中收入、TCO及毛利是基于氢车熟路商业模式、行业对标、及我们TCO基础模型进行估算出的结果，并不代表氢车熟路的实际运营结果。

下面的图48和图49显示了自营模式和租赁模式每百公里收入和成本的细分，以及按美元每百公里作为单位调整的相关购买成本和运营成本。总体而言，燃料电池车与电动车和燃油车辆相比，其高成本是由购买成本、燃料成本、维修费用、保险和加氢站成本等综合因素造成的。

可以看出，在自营业务模式下，燃料电池车及电动车都是可盈利的，而在使用租赁业务模式时，燃料电池车和电动车均不盈利。这种自营模式的盈利能力，主要是由于其每100公里产生的营运收入高于直接出租物流车辆产生的收入。尽管如此，使用燃料电池车能够实现盈利这一事实对于燃料电池行业的持续发展和商业化来说依然是一个重要的积极信号，同时也表明氢燃料电池自首次用于交通出行领域以来已经取得了长足的进步。

注释：业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。

图48. 自营模式下的TCO估算（单位：美元/每百公里）

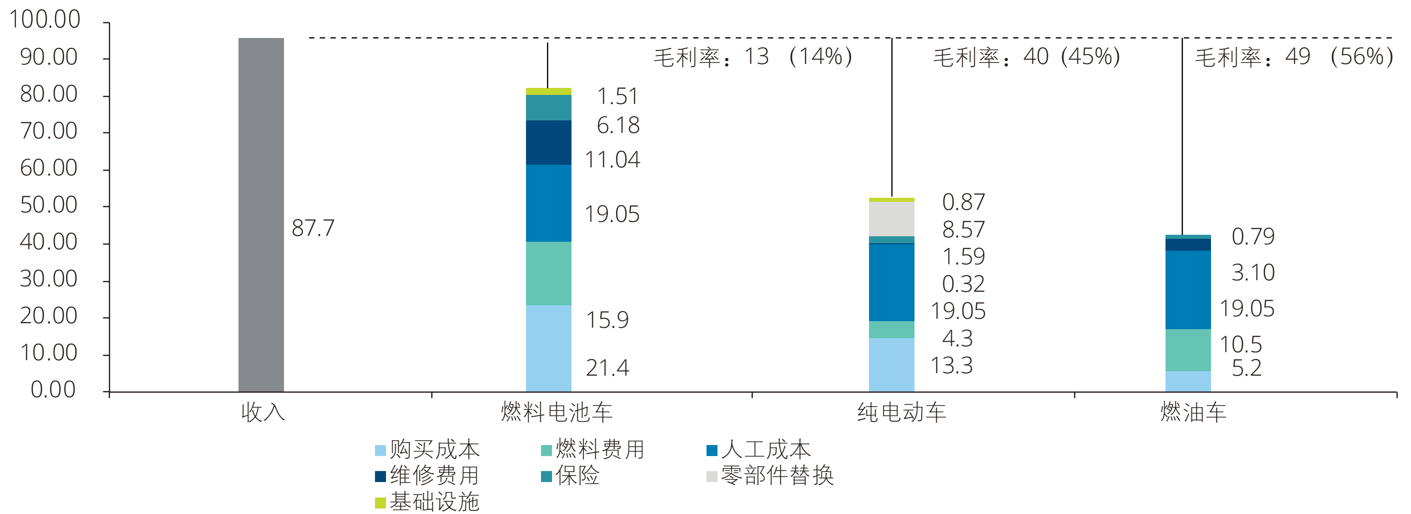
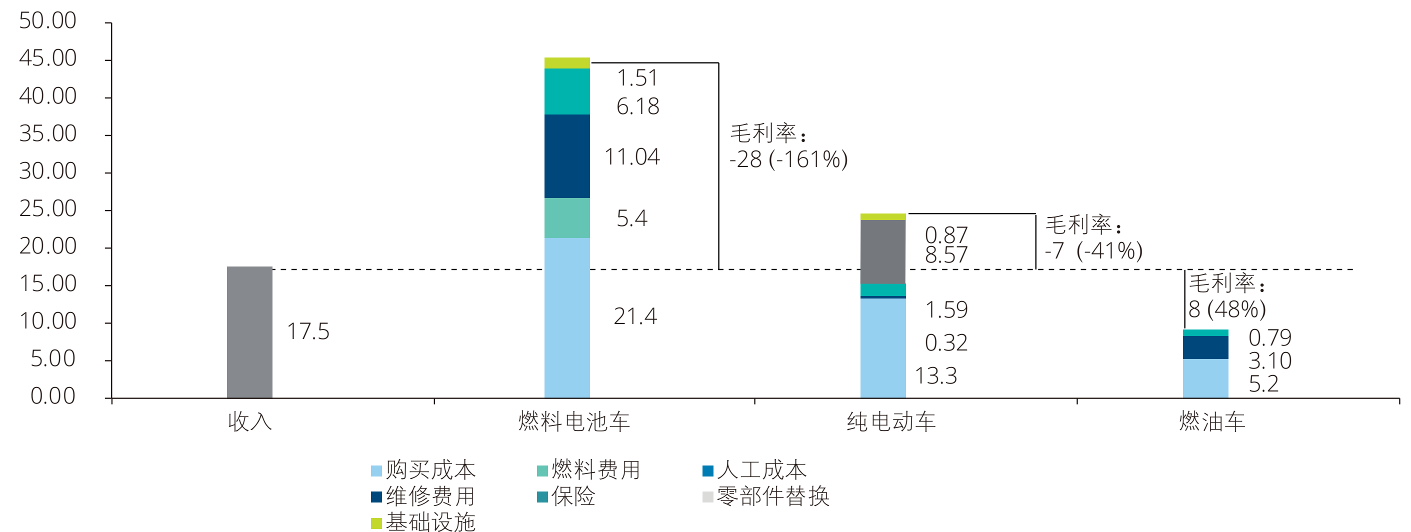


图49. 租赁模式下的TCO估算（单位：美元/每百公里）



注释： 业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。

图50. 规模经济效应对比

	燃料电池车	电动车	燃油车
上海保有车辆数	• ~500	• 5,000~20,000 [182] [183]	• >100,000 [184]
价格/千元	• 1,480 – 燃料电池系统：~750 – 储氢罐：45 – 零部件成本加成：385 – 其他零部件：300	• ~300	• 100~150
基础设施	• 过少的加氢站限制了燃料电池车的服务范围	• 中等，已有有部分充电站	• 充足

在我们的预计中，氢燃料电池物流车运营商选择了与燃油车辆相似的市场定价，并且为了促进燃料电池物流车的应用而承受了一定的运营损失。但需要注意的是，由于潜在的成本扣除项目和其他使用燃料电池物流车无法量化的优势，业务仍然有提高盈利的余地和空间。

首先，购买成本有很大的下降空间。假设运营商以每辆148万元的价格购买了500辆氢燃料物流卡车，其中燃料电池系统和油箱的成本占了近50%。我们预计随着技术的进步和燃料电池车产量的增加，燃料电池系统的生产将达到规模经济，到2024年燃料电池系统（包括油箱）将比最初购买时的成本下降70%。事实上，与2017年相比，2019年燃料电池系统的成本已经下降了30%。

此外，与3.1节所述的原因类似，燃料电池物流卡车中除动力装置之外的部分目前有很大的零部件成本加成。随着燃料电池车的规模经济的改善，预计这部分加成在未来还会下降（图50）。

基础设施成本也有下降空间。如前所述，上海只有3个加氢站，这限制了燃料电池卡车的服务范围。在我们的估计中，加氢站成本在自营模式下占运营成本的3%左右，在租赁模式下占6%左右。我们估计，基础设施成本在未来也将大幅下降。

注释：业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。

图51. 上海不同类型物流车辆定性对比

	燃料电池车	电动车	燃油车
污染物排放	• 零排放	• 零排放	• 温室气体污染排放和噪音
进入市区许可	• 约20%卡车拥有许可	• 大约5-10%卡车拥有许可[187]	• 只有5%的卡车拥有许可，限制了其在市区内的服务
其他车道使用权[66]	• 地方政府将通行费减半 • 允许使用公交车道	• 地方政府将通行费减半 • 允许使用公交车道	• 无

除了以上不同车辆类型之间的定量对比之外，使用燃料电池物流卡车还有其他无法量化的优势，如图51所示。

首先，由于燃料电池车和电动车没有排放，地方政府已经出台政策鼓励新能源汽车的发展。事实上，在重点防治大气污染的地区，新能源汽车占服务业车辆的比重有望达到超过80%[66]。使用新能源车还包括其他好处，如费用减免以及更多道路使用权[66]。此外，在上海，物流卡车在进入城区时都有严格的许可证制度，以减少污染，缓解拥堵[185 186]。只有5%的燃油卡车有这样的许可证，而根据行业专家的反馈，有20%的氢燃料电池卡车有这样的许可证，并且其目前正在与市政府进行谈判，将燃料电池卡车的许可证率提高到100%[169]。虽然我们可以认为，并不是所有的卡车和线路都需要许可证,但是拥有许可证对于车队运营，规划行驶路线等而言无疑都是有利的 （比如不用绕过城区从城市一端到另一端）。

对于内燃机交通工具来说，由于它的高排放量，因此有被替代的风险。自2000年以来，国家排放标准已经更新了6次，每一次都更加严格。最新的草案还提到加速淘汰低于国家排放标准的柴油卡车，并在部分城市试点零排放区域[66]。为了促进新能源汽车的发展，一种“双积分管理制度”已被应用于乘用车生产[188]。这是指向新能源汽车的生产给予正积分而向燃油车的生产给予负积分[188]。该系统将来也可能应用于商用车[189]。

注释： 业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。

基于当前的TCO，我们利用各种行业专家资源，进行了一系列推演来预测未来10年每个成本组成部分的趋势。不过正如我们之前提到的，估算结果主要是基于模型中的关键性假设，并不代表氢车熟路的实际运营情况。

图52和53分别为自营模式和租赁模式的预测结果。可以看出，到2024年，由于燃料电池卡车生产的规模效应，燃料电池系统和其他部件的价格预计将迅速下降，这将有助于自营模式的利润率迅速上升。到2025年，毛利率将上升到较为健康的53%水平，超过纯电动车。在2026年左右，我们估计燃料电池物流车辆的毛利率将超过燃油物流车辆。

租赁模式下，未来几年燃料电池车商业可行性的积极趋势更加明显。事实上，在2024年左右，使用燃料电池车运营的毛利率会高于电动车，并由负变正。随着采购价格的下降，我们预计2028年左右燃料电池车的毛利率将超过燃油车。

还需要注意的是，虽然我们将燃油车辆放入了对比中，但是基于我们在定性对比中提到的燃油车的替代风险，燃料电池物流卡车和电动客车可能成为未来的主流车辆。随着来自多个方面的压力上升，运营商极有可能逐步淘汰燃油车辆。

这些结果证明，在不远的将来，使用燃料电池车的物流运营商在中国市场将有巨大的机会。因此公司在这一领域大举投资也就不足为奇了。如上所述，燃料电池车辆的非量化优势进一步增强了其潜在的商业可行性。

图52. 毛利率估算——自营模式（单位：%）

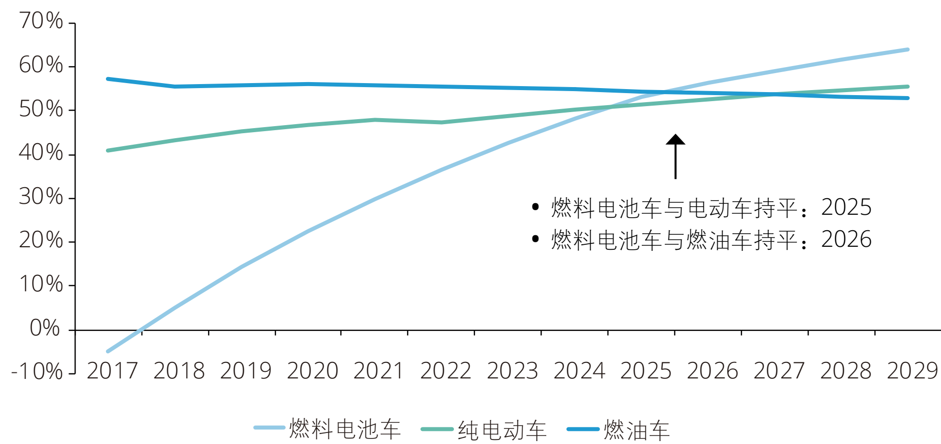
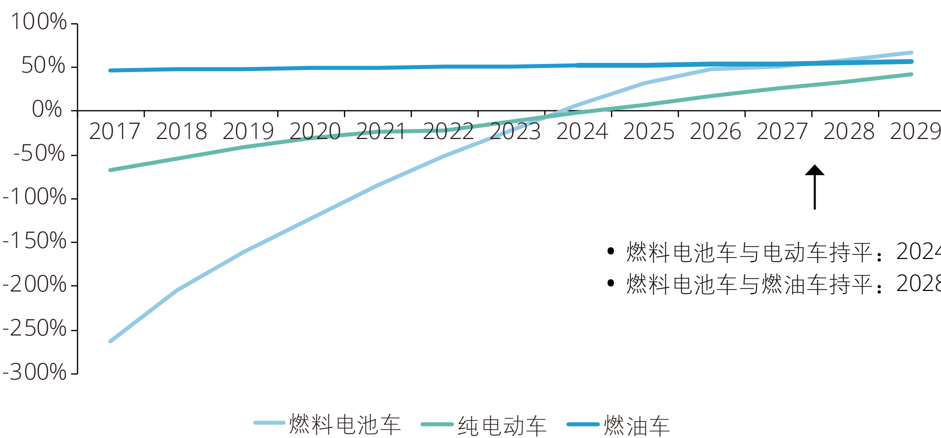


图53. 毛利率估算——租赁模式 （单位：%）



注释： 业务模式、收入、TCO和毛利率是根据文献综述、公开/市场信息、我们专有的TCO模型输入、与行业专家以及客户/业务伙伴的匿名访谈等进行估算的，本案例研究并不代表氢车熟路运营结果的实际表现。



3.2.2 案例分析2——港口重卡

洛杉矶港和长滩港都属于大洛杉矶地区，并组成了圣佩德罗湾（San Pedro Bay）港口综合体，该综合体处理的每艘船的集装箱数量超过世界上任何其他港口综合体[190]。近40%的进入美国的集装箱货物通过长滩港（“POLB”）和（或）洛杉矶港（“POLA”）[46]。洛杉矶港和长滩港也是燃料电池港口重卡应用的先驱，并通过各种测试和试点项目成为创新的灯塔。图54显示了港口重卡在洛杉矶港和长滩港口应用的主要里程碑。

2017年4月，丰田在洛杉矶港和长滩港推出了氢燃料电池卡车测试项目“Project Portal”[191]。这项研究是由丰田汽车北美公司、洛杉矶和长滩港、加州能源委员会和加州空气资源委员会合作完成的[192]。自2017年以来，丰田已经在洛杉矶和长滩的港口地区测试了其第一代8级燃料电池港口重卡，行驶了近1万英里[193]。

2018年7月，丰田展示了第二代8级燃料电池港口重卡Project Beta，并于秋季发布投入使用[193]。Beta版的特点是增加了储氢能力，将续航里程延长了约50%[194]，即从200英里延长到了300英里[196]。此外，Beta版的发布从概念验证转向了以商业化为目标的实地测试[194]。

2019年第四季度，作为“从海岸到仓库”项目的一部分，由丰田和肯沃斯生产的10辆燃料电池重型卡车将开始服务于洛杉矶和长滩的港口。该项目由丰田、肯沃斯、洛杉矶港、壳牌、UPS、南海岸空气质量管理区(South Coast Air Quality Management District)[144]合作推进，还包括由加州空气资源委员会提供的4100万美元资金。除了将投入使用的10辆卡车，2020年还将建成2个加氢站[195]。在2020年之前，这些卡车将使用长滩的加氢站，距离长滩港10分钟，距离洛杉矶港20分钟[197]。

另一个名为“ZECAP”的项目也在洛杉矶港启动，该项目由GTI管理，GTI是一个致力于解决全球能源和环境挑战的领先机构，同时部分资金由加州空气资源委员会提供[198]。该项目旨在验证零排放燃料电池混合动力港口重卡在现实世界中的商业可行性。两辆燃料电池混合动力港口重卡将在2020年3月左右投入使用。洛杉矶港的集装箱码头和装卸运营商TraPac将负责运营[199]。

在这些试验项目中使用燃料电池港口重卡为清洁能源提供了新的可能性。一方面，它展示了燃料电池港口重卡在未来的大规模使用由于其零排放的特点将对空气质量带来怎样的改善。另一方面，燃料电池技术在港口运输试验中积累了重要的运行数据，有利于在其他商用车上的应用。这是燃料电池车如何被利用最好的例子，在未来有广泛应用的潜力。详细的参数对比如下面的图55所示。

注释：商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

图54. 港口重卡在洛杉矶和长滩港口应用的里程碑



注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

图55. 不同港口重卡参数对比

肯沃斯 T680 [206]



- 原型发布：2018.02
- 用途：概念验证 [207]
- 动力机性能：420 kW；1,850磅-英尺（2,507 牛米） 扭矩
- 燃料电池系统：85 kw
- 储氢罐容量：30 kg
- 电池容量：100 kWh
- 总载重能力：~36.3吨 [201]
- 续航里程：~209公里

丰田 Beta



- 原型发布：2018.07（2019年第四季度部署）
- 用途：商业可行性验证
- 动力机性能：670马力（500千瓦）；1,325磅-英尺（1,796牛米）扭矩
- 燃料电池系统：Mirai燃料系统x2 [201]，每个额定功率114 kW [202]
- 储氢罐容量：60kg [200]
- 电池容量：12 kWh
- 总载重能力：~36.3吨 [201]
- 续航里程：~480公里 [201]

电动重卡



- 动力机性能：340-740马力 （250-550千瓦）；2,000 – 4,000牛米扭矩
- 电池容量：200-600kWh [203]
- 总重量能力：20-47吨
- 续航里程：150-300公里 [203]

燃油重卡



- 动力机性能：400马力（约300千瓦），1,200–1,800 磅-英尺（1,600-2,500 牛米）扭矩 [204]
- 总重能力：~40公吨 [204]
- 行驶距离：> 1000公里 [205]

注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

图56： 港口重卡在洛杉矶港和长滩的三种任务模式[46]

	行驶距离	使用占比	覆盖区域
码头范围运营	• 2-6英里	• 64%	• 从集装箱移至联运集装箱转运设施
当地运营	• 20英里以内	• 10%	• 从港口到仓库，卡车码头，或洛杉矶市中心的主要铁路站点以及康普顿和多明格斯市
区域性运营	• 20-120英里	• 26%	• 从港口到南部的墨西哥边境，东部的科切拉山谷，北部的贝克斯菲尔德

图57： 物流公司在洛杉矶和长滩港口使用燃料电池港口重卡

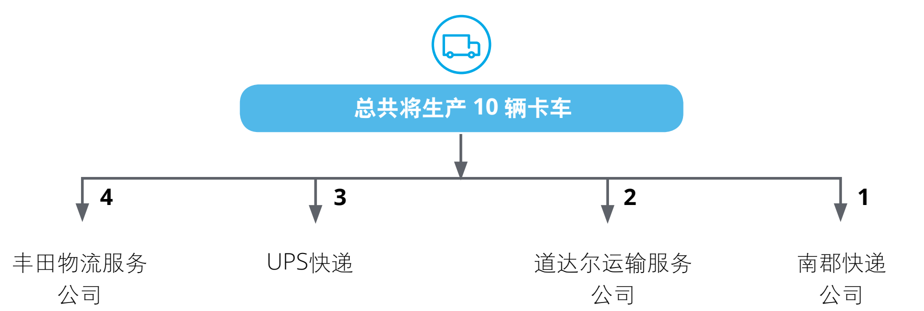
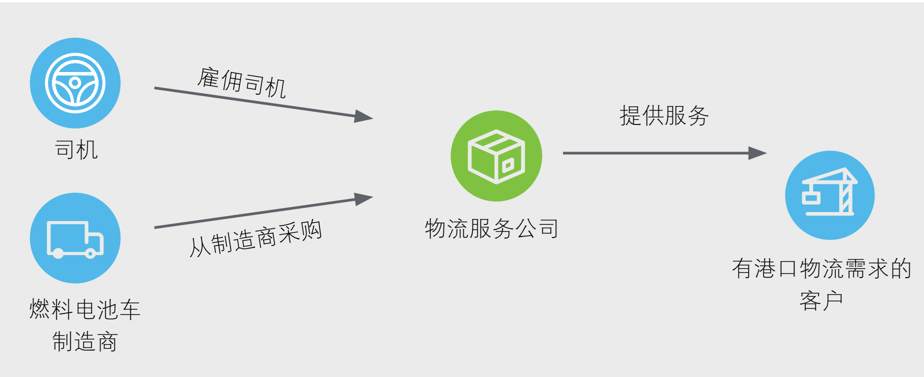


图58：港口重卡运营商业模式



如图56所示，在洛杉矶和长滩的港口，那些港口重卡基于行驶距离有三种任务模式：码头范围运营、当地运营和区域性运营[46]。由于港口中各模式下的行驶距离相对于其他重型卡车的行驶距离都较短，因此港口中转是燃料电池港口重卡应用早期较为合适的使用场景。所有三个工作模式都在燃料电池重卡的最大续航里程（480公里）之内。

目前，10辆燃料电池港口重卡将由4家物流服务公司拥有。如图57所示，丰田物流服务公司将运营4辆卡车。UPS快递将拥有3辆，道达尔运输服务公司将拥有2辆，而南郡快递公司将拥有1辆[195]。一般来说，物流服务提供商从原始设备制造商那里购买车辆，并雇佣司机组成自己的车队，然后从有港口物流需求的客户那里接受订单（图58）。我们假设这些燃料电池卡车的商业模式将类似于在本案例中使用传统动力系统的卡车。

注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

我们在图59中估计了2019年不同类型的港口重卡每百公里的TCO。主要的几项成本构成部分的选择是基于我们前面提到的典型的卡车运营模式，包括购买成本、燃料、人工、维修、保险、许可证和加油站成本。可见，购买成本和燃料成本是燃料电池卡车总拥有成本的两项主要增量成本。

从图60中，我们可以看到燃料电池港口重卡的TCO在未来10年里将有明显的下降。这是由于购买卡车的费用和燃料费用等的减少。随着第3.1节中所讨论的技术改进，我们估计燃料电池系统和储氢罐作为燃料电池港口重卡的主要成本构成因素，其价格将大幅下降。每百公里燃料电池卡车的燃料成本也预计在未来10年达到接近燃油卡车的水平。燃料电池卡车的TCO预计将在2024年左右低于电动卡车, 2028年左右低于燃油卡车。

燃料电池技术在港口运输中的应用还有其他定性方面的好处（图61）。燃料电池港口重卡不仅是一种零排放的交通工具，而且具有与柴油卡车相似的性能。如今，长滩港和洛杉矶港的配套港口有1.6万 辆重型卡车提供服务，并因此成为空气质量不佳的重点地区。因此，该地区已成为南海岸空气质量管理区（SCAQMD）努力改善空气质量的重点，特别是在港口服务的卡车数量预计将在2030年增加一 倍，达到每天32,000多辆[201]。虽然燃料电池卡车和电动卡车都是无污染的清洁车辆，但是电动港口重卡充电一次能够行驶的续航里程相对较短且充电时间需要数小时，限制了电动港口重卡在区域作业和多班次作业中的使用。

图59. 重卡TCO拆分 （单位：美元/每百公里）

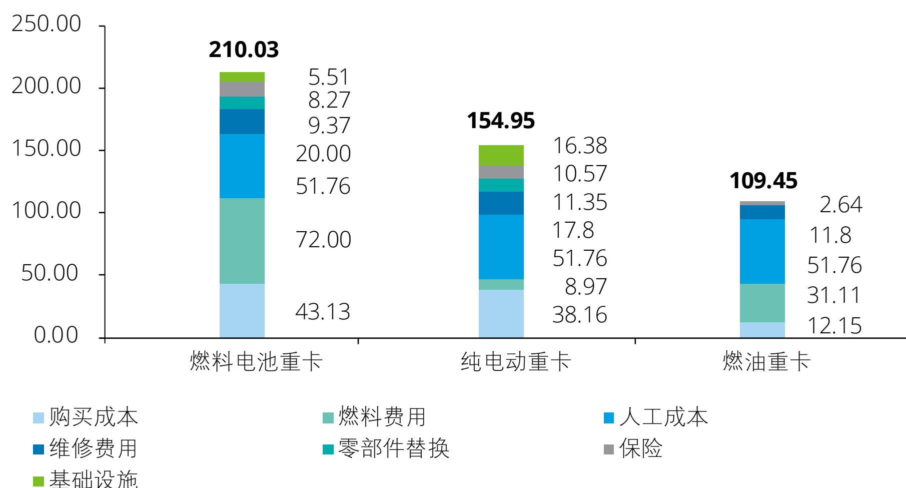
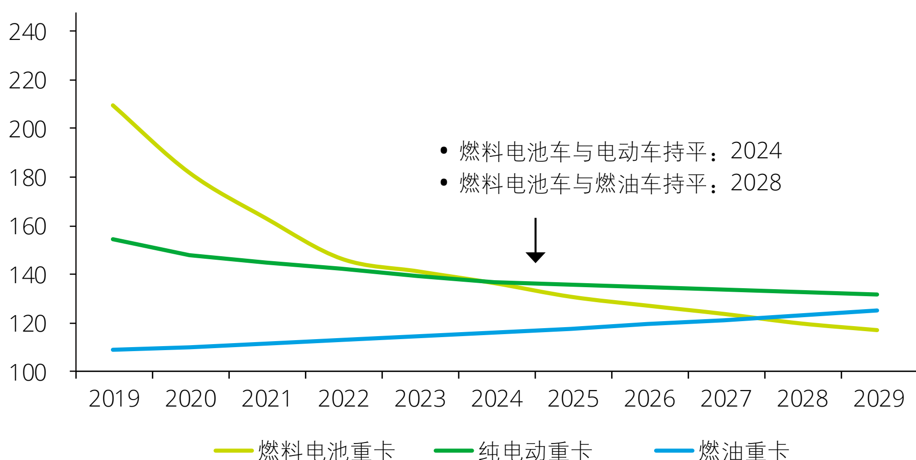


图60. 重卡TCO预测（单位：美元/每百公里）





注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

图61. 洛杉矶港和长滩港不同类型港口重卡的定性对比

	燃料电池车	电动车	燃油车
污染物排放	• 零排放	• 零排放	• 大量污染物排放
车辆使用寿命	• 尚在测试中	• 使用几年后需更换电池	• 10年左右
加油（氢）/充电时间	• 5-10分钟	• 3-5小时	• 5-10分钟
基础设施	• 虽然数量有限，但加氢站的数量正在增加。目前加州有40个加氢站[197] • 一些重点战略位置的加油站（例如，在港口和货运走廊）可以满足燃料电池卡车的大部分加氢需求	• 适用于重型车辆的高功率充电站（350kw）比较有限 • 西海岸有大量120kw及以下的充电站	• 充足
运营类型	• 码头范围运营 • 当地运营 • 区域性运营	• 电池重量和续航里程是区域性运营和长期运营的最大问题	• 码头范围运营 • 当地运营 • 区域性运营



3.2.3 案例分析3——公交车

伦敦交通局（Transport for London）是伦敦的综合运输管理机构，负责城市公共交通网络的日常运营，包括公交车、地铁、轻轨、出租车等[208]。图62显示了伦敦交通局在氢燃料电池公交车应用中的重要里程碑。

2003年12月，为减少空气污染，伦敦交通局在伦敦市区开始了第一代燃料电池公交车的试验[209]。该试验也是欧洲HyFleet：CUTE（燃料电池客车示范计划）项目的一部分。该项目由欧盟和英国政府资助，汇集了31位来自欧洲各地的行业和政府合作伙伴，旨在推动欧洲氢能源运输系统的发展[210]。

在试运营取得成功之后，2010年，作为"清洁氢能源城市"（CHIC）项目的一部分，伦敦交通局购买了5辆新一代氢燃料电池公交车[211]，并将其投入正式运营，为伦敦市民提供服务。在英国，这是第一次一条完整的路线完全由氢能源动力公交车运行[211]。

2013年，伦敦交通局购买了3辆氢燃料电池公交车，并将车队规模扩大到了8辆[211]。2015年，伦敦交通局又为车队增加了两辆燃料电池公交车[212]。目前，10辆零排放燃料电池公交车正在伦敦市中心的RV1号线路上为伦敦市民服务。

2019年5月，伦敦交通局又订购了20辆氢燃料电池双层巴士，这将进一步扩大其零排放公交车队。这20辆氢燃料电池巴士将于2020年在245号、7号和N7号三条线路投入运营[213]。

在图63中，我们对比了三种类型公交车的主要参数。

注释：商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

图62. 氢燃料电池公交车应用的里程碑



图63. 三种类型公交车的主要参数对比

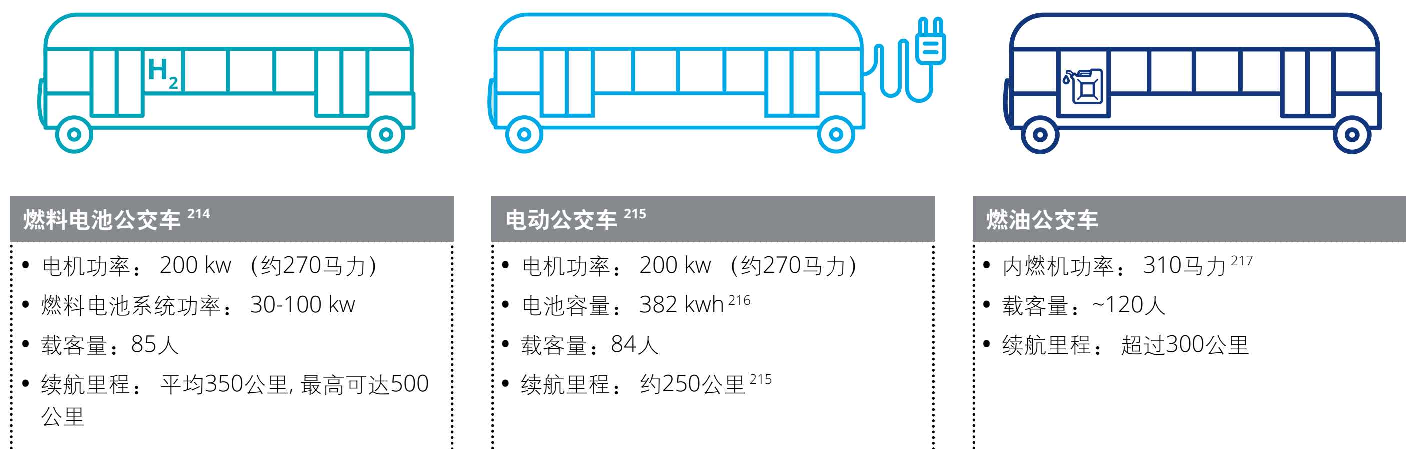


图64. 伦敦公交车运营模式



注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们的专有TCO模型输入等进行估算的，并不代表洛杉矶和长滩港口牵引卡车的实际运营结果。

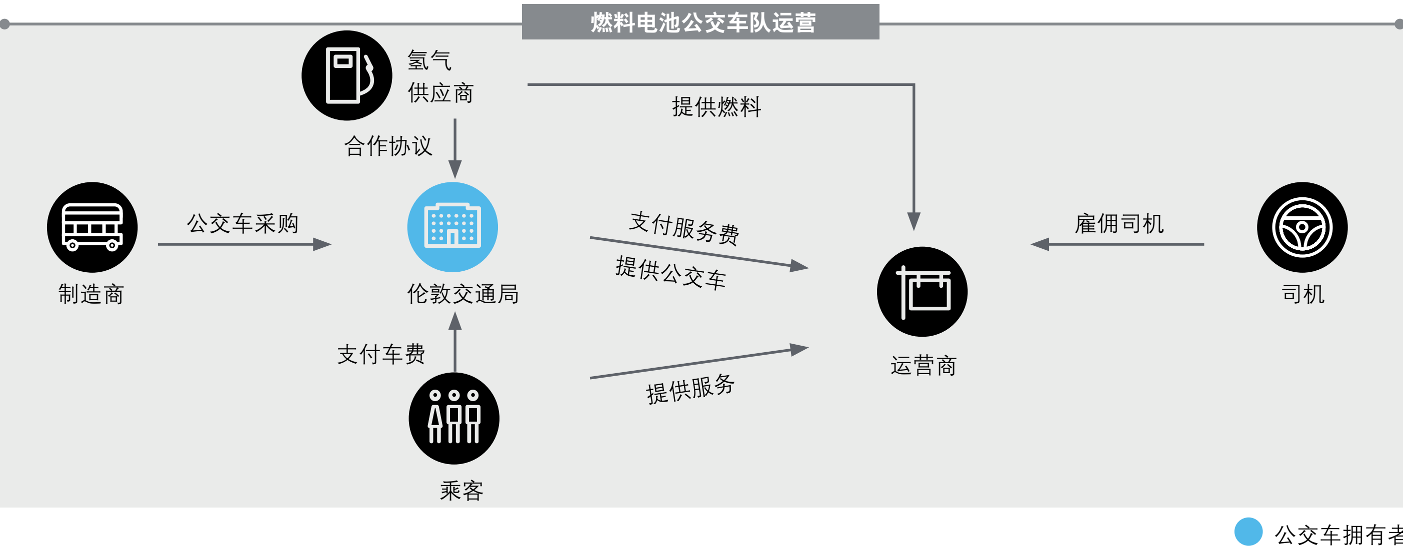


图65. 伦敦燃料电池公交车运营路线 [221]

线路	终点站	站数	线路长度	运营商	车库编号
RV1*	• 塔网关 (Tower Gateway) • 考文特花园 (Covent Garden)	10	9.7 km	易塔通（Tower Transit）	LI
7	• 东阿克顿 (East Acton) • 牛津广场 (Oxford Circus)	7	10.6 km	伦敦美罗连线公交汽车公司(Metroline)	PV
N7	• 诺霍特 (Northolt) • 牛津广场	12	24.6 km	伦敦美罗连线公交汽车公司(Metroline)	PV
245	• 阿尔珀顿 (Alperton) • 戈尔德斯格林 (Golders Green)	6	15.4 km	伦敦美罗连线公交汽车公司(Metroline)	PV

停止运营　　燃料电池公交车将于明年投入运营

图64展示了伦敦交通局公交车运营的2种商业模式。

燃料电池公交车将于明年投入运营

在常规的公交线路运营中，伦敦交通局对符合条件的私营运营商采取招标，中标的运营商将在这条线路上提供服务。一般而言，运营商应购置车辆及雇用司机，组成自己的车队。这些合同通常为期5年， 以最优经济价值为基础，同时兼顾质量和安全。该合同将设定与运营里程和服务的整体可靠性关联的服务费用[218]。日常运营中乘客支付的车费收入由伦敦交通局收取。

然而，由于燃料电池公交车仍处于早期阶段 (图65)，伦敦政府希望推动燃料电池公交车的使用，因此对燃料电池公交车运行的路线采取了不同的运营模式。伦敦交通局在英国政府和欧盟的财政支持下，从VanHool和怀特客车两家制造商采购了燃料电池公交车[213]。伦敦交通局将燃料电池公交车的运营授权给运营商，由运营商雇用司机并提供服务[218]。

在燃料电池公交车上使用的大部分氢燃料都是在大型生产设施中生产，然后被运送到车库，以液体或压缩气体的形式储存[219]。在伦敦，Air Product是伦敦交通局的氢燃料合作伙伴，为城市计划中的氢燃料电池公交车车队供应氢燃料，并建造和维护氢燃料补给基础设施[220]。

注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们专有的TCO模型的输入等来估计的，并不代表伦敦交通局伦敦燃料电池巴士的实际运营结果。RV1号线路在2019年6月14号被永久撤销

图66. 伦敦公交车TCO拆分 （单位：美元/每百公里）

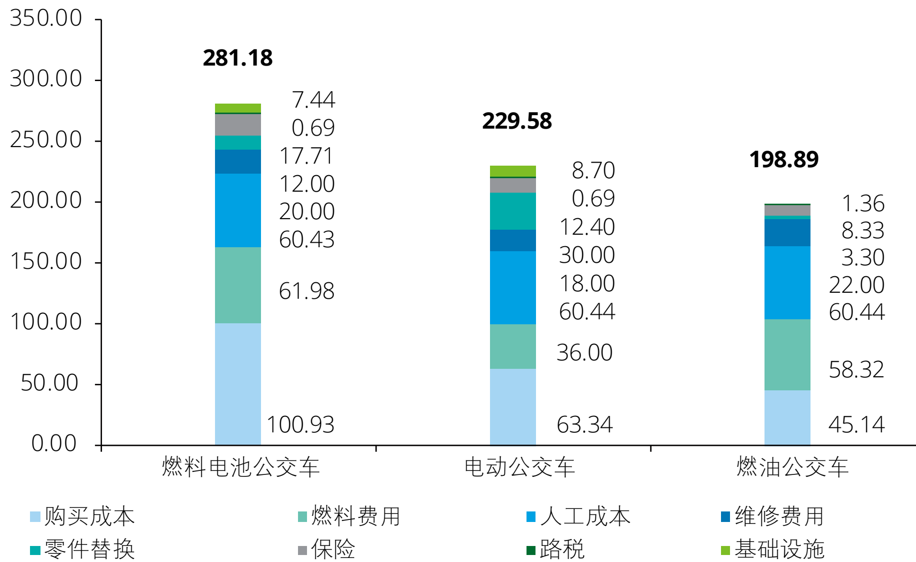
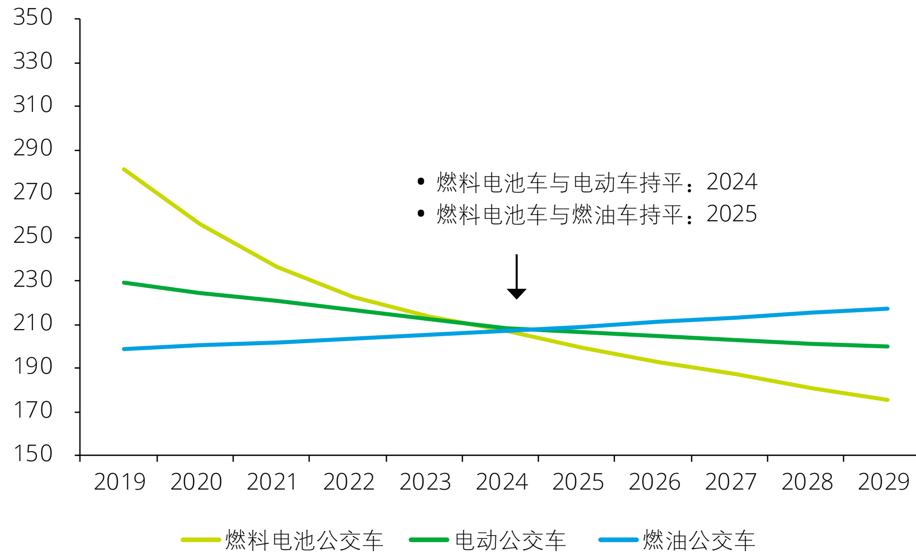


图67. 伦敦公交车TCO预测 （单位：美元/每百公里）



在这个案例分析中，我们假设英国的燃料电池公交车的运行方式和其他任何正常的公交车运营模式一样（即运营商购买车队），并从运营商角度出发，以便与电动车和燃油车进行比较和对比。

图66显示了我们的TCO计算结果，包括购买成本和运营成本。与其他两个应用案例一样，购买成本和燃料成本构成了燃料电池公交车的主要增量成本。由于高昂的购买价格，燃料电池巴士的保险成本也很高。但我们估计，随着燃料电池系统和氢燃料价格的下降，这些成本将很快下降。与其他两个案例分析相比，该案例中另一个额外的成本组成部分是路税，这是英国对高排放车辆征收的额外税收[222]。三种类型的公共汽车都要缴纳路税，但由于高污染排放，燃油公交车的路税要高很多。虽然从整个TCO的角度来看，路税的总额很小，但这对清洁能源汽车的推广是一个积极的信号。

在图67中，我们预测了未来10年燃料电池公交车的TCO。我们预计，英国的燃料电池公交车的TCO在2024年左右将低于电动公交车，在2025年左右将低于燃油公交车。

注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们专有的TCO模型的输入等来估计的，并不代表伦敦交通局伦敦燃料电池巴士的实际运营结果。

图68. 伦敦不同类型公交车定性对比

	燃料电池车	电动车	燃油车
污染物排放	零排放	零排放	有污染
加油（氢）/充电时间	5-10分钟	4-5小时[223]	5-10分钟
基础设施	有限，英国只有17个加氢站*[224]	中等	充足

虽然燃料电池公交车的TCO目前要高于电动公交车和燃油公交车，但是燃料电池技术在城市交通中应用的好处会体现在其他方面，如图68所示。

首先，燃料电池公交车绝对符合伦敦政府的排放标准，有广泛应用的潜力。2019年4月，伦敦开始引入“超低排放区”（“ULEZ”）（图69）。超过排放标准的车辆进入该区域时，每辆车，无论是轿车、摩托车还是货车每天将被收取12.5英镑的费用。对于大型车辆，包括卡车（超过3.5吨）和公共汽车或长途汽车（超过5吨），每辆车每天将收取100英镑[223]。根据伦敦市政府的规定，只有负荷排放标准的清洁汽车和货车才能免交“超低排放区”费。不符合欧盟“欧六”排放标准的柴油车和大部分生产超过14年以上的汽油车都必须缴纳费用[224]。超低排放区域的划定范围预计将首先在2020年针对公交车、长途汽车和卡车等大型车辆进行扩大，然后在一年后的2021年10月25日扩展到所有伦敦市中心城区[225]。

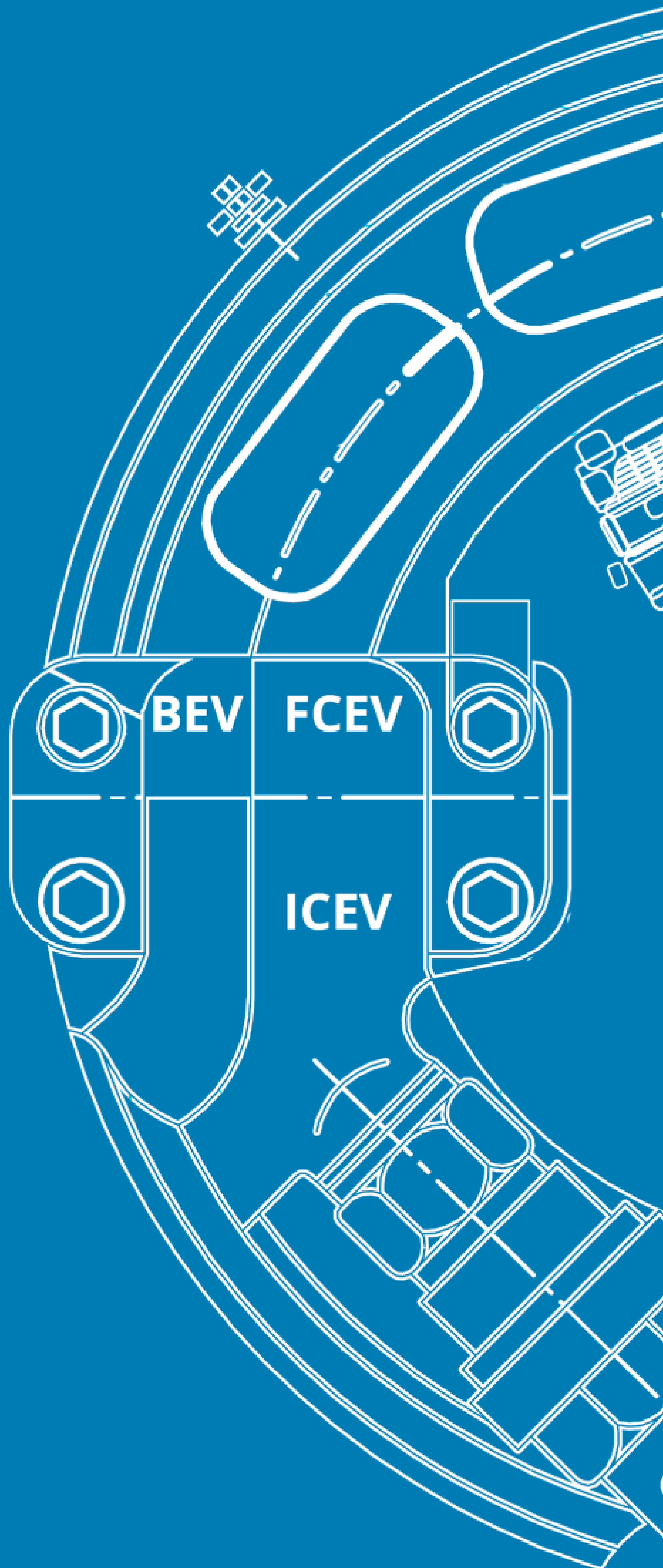
超低排放区的实行是实现伦敦市长提出的到2025年将伦敦的二氧化碳排放量减少到1990年水平60%的目标的重要步骤之一[226]。在可预见的未来，市政府对机动车排放的要求将越来越严格，这使得传统的燃油车辆的行驶成本大大提高，而电动车/燃料电池车等绿色车辆将是更好的商用和民用选择。事实上，使用绿色交通工具的趋势是不可阻挡的，正如伦敦交通局在年度报告中提到的，其从2018年起，将只采购混合动力或零排放的公交车。

图69. 伦敦超低排放区倒计时



- 超低排放区 首先在伦敦市中心实行
- 计划将扩大公交车、大巴及货车等大型车辆的超低排放区范围
- 计划将超低排放区扩展至南北环线，规定将适用于汽车、货车、小巴及摩托车等各种车型

注释： 商业模式和TCO是根据文献综述、公共/市场信息、我们专有的TCO模型的输入等来估计的，并不代表伦敦交通局伦敦燃料电池巴士的实际运营结果。
*固定式加氢站


BEV
FCEV
ICEV

能源效率与环境影响的比较

4.1 能源效率分析框架

在前一章节中，我们深入讨论了燃料电池车的实际应用，并将其在真实案例分析中的总拥有成本与电动车和燃油车进行了比较。从分析结果来看，未来燃料电池车的使用成本将逐渐接近直至低于电动车及燃油车，此外燃料电池车还拥有零排放、绿色出行的优势，这些好处受到全球各国政府和私营企业的广泛赞誉。从这个角度来看，燃料电池车的未来确实是光明的。

但是，从宏观经济和整个社会影响的角度来看，我们必须考虑许多其他因素。例如，氢是如何生产的？它是如何从生产现场运输到车辆上的？过程中每一步的能源效率是多少？同样，燃料电池是如何生产的，这种生产过程对环境有什么影响？它们可以回收吗？以上问题的现状及未来变化趋势都值得深入分析和思考。

在这一章节中，我们将讨论：

- 燃料电池车相比其他类型车辆的“油井到车轮”（WTW）生命周期的能源效率（能源转换效率，能源消耗及温室气体排放）
- 氢气的生产及其对效率的影响
- 燃料电池相比其他车型从始到终完整生命周期的能源及材料效率（如车辆和燃料电池/电池制造，关键零部件的处理/回收/翻新等）
- 对环境影响的评估，包括原材料储备的充足性
- 近期和未来的技术发展及其相关影响

4.1.1 “油井到车轮”（WTW）生命周期能效分析

在考虑整体车辆的能源效率时，通常使用“油井到车轮”（WTW）生命周期分析。这可以分为两个阶段，通常分为“油井到油箱”和“油箱到车轮”。前者通常是指从原料到将其运输到到车辆的燃料储存装置的燃料生产环节，而后者是指车辆运行阶段的能量消耗[227]。在考虑不同车型时，其主要WTW能量转换阶段可分为：

- 对于燃料电池车：氢燃料生产，运输和储存到车辆氢气罐，以及燃料电池车运行中的燃料电池使用
- 对于纯电动车：发电，通过电网输电，给纯电动车电池充电，以及在电动车运行中的用电
- 对于传统燃油车辆： 汽油/柴油开采、精炼、运输到加油站，以及车辆运行过程中的燃料消耗

下图70显示了每种车型的每一步能源效率。

图 70： 车辆油井到车轮生命周期分析框架（按动力方式划分）

能源效率	油井 → 油箱 4.1.2 生产	4.1.3 运输	油箱 → 车轮 4.1.4 使用	油井到车轮整体能源效率
燃料电池车	**23~69%** [228 233 234 235 236227] • 转换效率范围来源于不同的制氢方式 • 生产效率=原料提取效率X燃料制氢效率 • 详情请参阅下文	**54~80%** [230 231 232] • 能量损失来自压缩、运输（管道/卡车）、储存（气态/液态氢）过程中的能量损耗	**36~45%** [230 232] • 氢转化为电能，电能转化为机械能 • 与纯电动车运行相比，其产生额外的能量损失是由于多出的氢气到电能的转化步骤	**4~25%**
纯电动车	**35~60%** [234 235 236] • 转换效率范围的不同取决于不同的发电方法，以及在不同国家之间差异极大的电网建设	**81~84.6%** [235 236 240] • 输电过程中的平均转化率约为90%-94% • 充电过程中具有90%的能源转换效率	**65~82%** [229 230] • 车辆运行时在电能转换过程中的能量损耗包括电机、交流转换、辅助部件和传动系统的损耗，不包括充电过程	**18~42%**
燃油车	**82%~87%** [234 238 239] • 矿物燃料开采、精炼过程中13~18%的能量损失	**~99%** [237] • 在运输过程中，由于蒸发、溢出或附着在容器上而造成的少量能量损失	**17~21%** [229] • 大部分能量以热的形式损失 • 作为目前主流的车辆类型，经过多年的改进，目前的效率已经接近内燃机的极限	**14~18%**

如图70所示，燃料电池车的整体能源效率很大程度上受氢气的生产和运输，以及在将氢能转化为动能的燃料电池技术的影响。反对燃料电池车的人会争辩说，氢能源本质上不如电池汽车，因为氢必须从电（通过电解）中产生，然后再转换回电，这其中必然会有能量损耗。然而，当我们更详细地研究氢能源的产业链时，情况并非如此。例如，氢也可以从天然气中产生，而相关的碳可以被捕获和回收。

那么今天氢是如何生产和运输的呢？它们对能源效率有什么影响？未来的生产和运输趋势将如何变化？这些都是值得深入分析的复杂问题，我们将在本白皮书系列的下一卷中讨论这些问题。然而，出于本文的目的，我们将在较宏观的层面上讨论从油井到车轮过程中完整的能量转换，重点关注当前和未来的趋势。

燃料电池车、纯电动车和燃油车燃料生产的能效比较
燃料电池车在制氢阶段的能量转换为23%~69%。效率的差异来源于不同的制氢途径，这一点我们将在本节稍后的部分中更详细地分析各种不同类型的制氢原料以及不同的加工技术。

制氢过程的能源效率由两部分组成：1) 原料的提取和回收效率;2) 燃料转化为氢的效率。美国能源部已经将不同类型燃料的转化成氢气的能效统计汇编，我们将在下一节中探讨。[233]

以电解为例——集中式电解水制氢方法中从电到氢的能量转化率为66.8%[235] [233]。然而，电力本身的能源效率约为35%-60%。这一广泛的范围取决于不同的发电方式——燃煤发电和天然气联合循环发电导致了相当不同的效率和温室气体排放[228 233 234 235 236]。在电解制氢过程中，很明显燃料电池车与纯电动车在燃料生产阶段能效差异的核心原因是电解制氢过程中燃料电池车的电能向氢气的二次能源转换。

对于使用柴油或汽油的常规内燃机，生产阶段的能源效率更标准化，约为82%-87%，在化石燃料开采、精炼和回收过程中，能源损失约为13~18%.[234 238 239]













燃料电池车、纯电动车和燃油车的三种能源运输方式的能效比较

对燃料电池车：氢气可以以压缩气体、液体或固体的形式进行运氢和储氢，前两种是最常用的方法。将氢压缩成液体用于运输和储存会造成40%~46%的效率损失，这主要是由于低温压缩氢所需要的能量[231 230]。虽然以气体形式压缩氢气的效率更高，但仍会带来系统整体效率的损失，气态氢的总能源效率约为72%~80%。[230 231 232]

纯电动车的能量传递相对简单；其输电过程中的平均损失率约为7%-10%，预计到2020年将降至6%[235 240 236]。充电过程中还有10%的能量损耗。还应该注意的是，电池会自我放电，但由于难以量化[94]，因此我们没有将这些损失包括在本分析中。

对于燃油车，汽油在装卸、运输和零售过程中的总损失率低于0.4%，柴油为0.28%，损耗主要是由于蒸发、溢出或附着在容器上[241]。



氢气运输



电力传输



化石燃料运输

燃料电池车、纯电动车、和燃油车的油箱到车轮（TTW）能效比较

从图70可以看出，燃料电池车辆需要先将氢气转化为电能，再转化为动能，其储氢设备到车轮阶段的能量效率为36%~45%[230 232 243]。按照现行行业标准，燃料电池系统的电能效率约为55%，即燃料电池系统用氢气进行发电过程中的效率[94 242]。对于纯电动车，电池到车轮的能效约为65%-82%[229 230 234]。

虽然燃油车在从油井到油箱阶段具有很高的能源效率，但传统的汽油汽车只能将储存在汽油中的约17%-21%的能量转化为车轮的动能，其余大部分能量以热能的形式流失。即使经过几十年的改进，这依然是内燃机难以改善的弱点[229 234]。总体而言，传统汽油燃油车的油井到车轮能量转换率为14~18%，低于纯电动车和燃料电池车的最大效率。



燃料电池车



电动车



燃油车

4.1.2 氢气生产及其能源效率

正如我们在前一节中看到的，氢气的生产在燃料电池车整个生命周期的能源效率中起着主导作用[247]。

在本节中，我们将首先了解一些关于制氢方式的知识，并将在本系列的后续白皮书中继续探索这一具有吸引力的主题和近年来的技术突破。

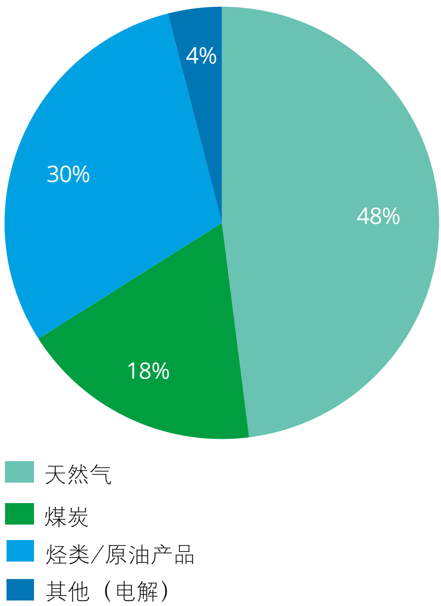
今天，氢可以通过多种能源和技术来生产[245]。从图71可以看出，当今全球氢气生产原料以化石燃料为主，占全球氢气产量的96%[245]。48%的氢产自天然气，30%来自于烃类/原油产品，18%来自煤炭，只有4%来自电解水。

如今，全球每年的纯氢产量约为7,000万吨，其中大部分用于炼油和工业生产（例如氨）。目前只有少于1万吨的氢气用于燃料电池车的燃料[245]。

目前大多数氢是用非环保方法产生的，其主要原因有以下几点：

1. 传统上，氢主要用于工业，交通工具和燃料电池只占非常小的比例[245 248]。
2. 部分由于第一点的原因，人们并没有过多地关注氢气这一种清洁能源，但在全球范围内这一情况正迅速地发生着变化[227]。
3. 电解水虽然在原理上非常简单，但与其他生产方法相比，目前其成本仍十分高昂，因为首先必须产生电力，这导致氢气生产的整体效率较低[249]。但是，考虑到可再生能源（如太阳能和风能）发电由于受季节性和高峰使用周期的影响，而时常导致的电力产能过剩和浪费，情况就大不相同了[31 250 251]。可再生能源的边际成本接近于零，导致其定价低于其他电力的主流市场定价，甚至是负定价[252]。例如，德国、比利时、英国、法国、荷兰和瑞士都由于可再生能源电力生产过剩出现过电价为负的情况[253]。

图71. 全球纯氢生产所用能源（2018）[244 245]



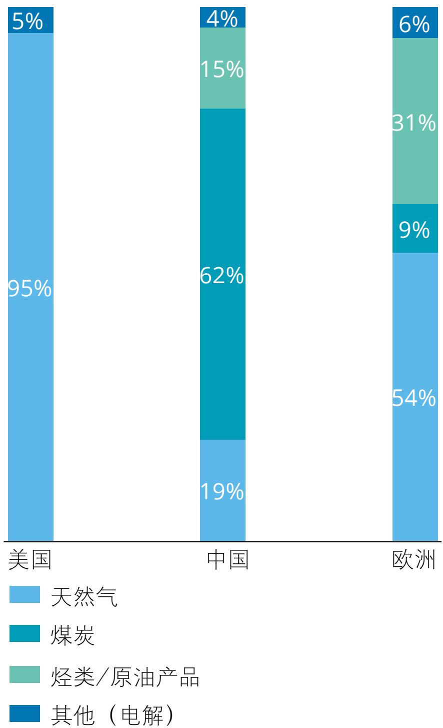


氢气生产方式也因不同国家地理位置的不同而有很大差异（图72）。在美国，95%的制氢是通过大型中央工厂的天然气重整来实现的，这是我们短期内制氢的重要途径[254]。天然气制氢之所以成为美国氢气生产的主要方式，是因为它是目前最经济实惠的生产方法[255]。

中国是世界上最大的制氢国，2017年的制氢量约为1,900万吨[261]，62%左右的制氢量来自煤或焦炉生产[31 256]，因为中国传统上就非常依赖煤炭生产能源[31 256]。然而，随着中国在全国范围内全面转向绿色、可再生能源，这种情况正在改变。在中长期规划中，可再生资源作为氢气制取的来源将发挥越来越重要的作用。根据中国氢联盟的数据，到2050年，大约70%的氢将由可再生能源生产。

日本长期专注于可再生能源的发展。从供给端看，日本的氢气既有国内生产，也依赖进口。日本本土氢气的主要来源是工业副产品和天然气重整[23]。从长远来看，日本的目标是与其他国家一起发展国际氢气供应链，利用来自海外的低成本过剩能源和碳捕获与存储（“CCS”），以及廉价的可再生能源[23 257]来生产氢气。

图72. 不同国家制氢方式占比[31 257 261]



欧洲氢气产量占全球氢气产量的21%，目前主要由化石燃料生产。94%的氢气生产来自化石燃料，其中54%来自天然气，31%来自石油，9%来自煤炭[258]。然而，欧洲正在努力开发更清洁的氢气生产方式。根据欧洲氢气发展路线图，电解水将在未来制氢过程中发挥重要作用[260]。例如，德国正在积极寻求利用可再生资源，特别是风能进行电解制氢[259 260]。

制氢工艺技术多种多样，可分为5种典型工艺[255 263]：

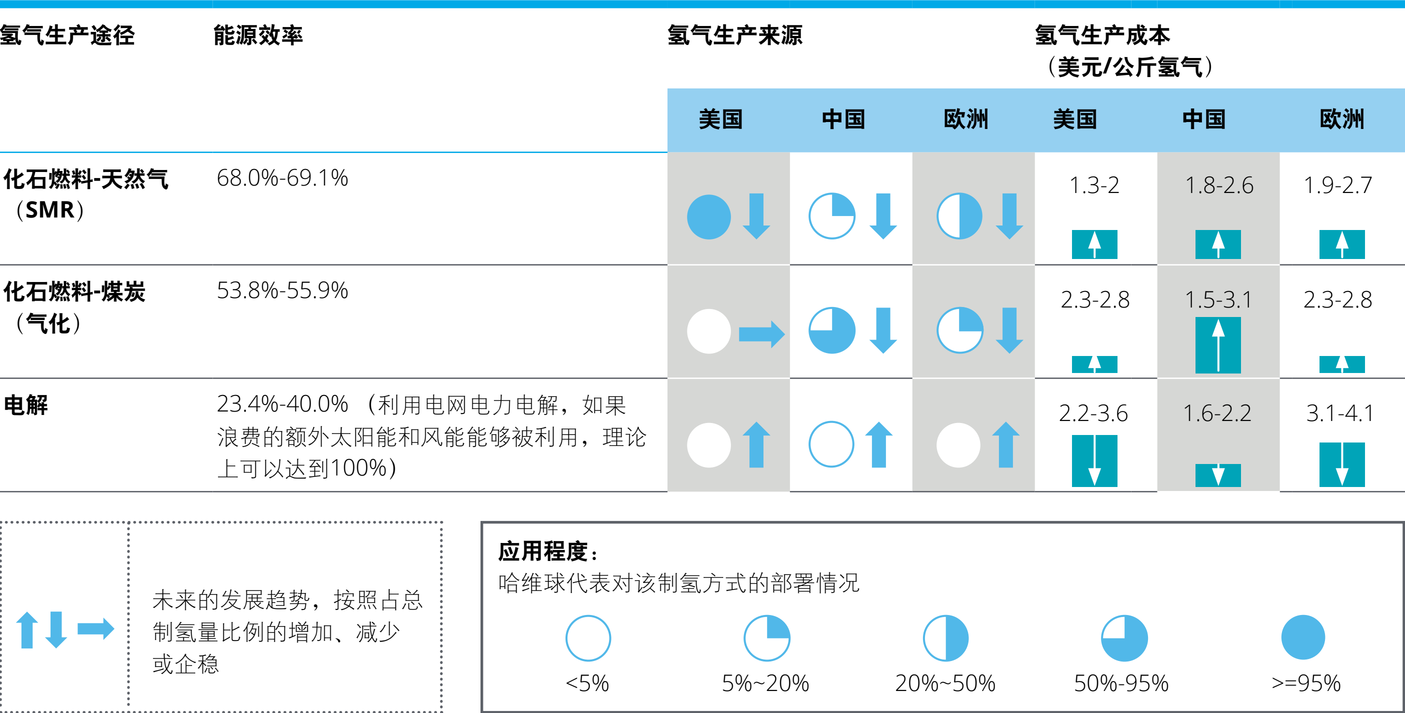
- 化学方法，包括蒸汽重整、部分氧化、气化和裂解
- 生物方法
- 电解水
- 光解
- 热化学方法

图73给出了详细的制氢途径。在全球范围内，目前最成熟、最普遍（也是最经济）的生产方法是通过天然气制氢（SMR），又名烃类蒸汽重整制氢技术[254]。然而，天然气的不可持续性并不符合氢气作为未来清洁和可持续能源的定位。电解被认为是一种更可持续的制氢方法，然而，从生命周期的角度来看， 电力来源对能源的“清洁度”影响较大，因为电力的制取方式与能源消耗和温室气体排放有很强的相关性。此外，目前使用电解的生产成本仍然相对较高[262]。

图 73. 氢气生产途径 [245 246 254 255 261 263 264 265 266]

类型	途径		原理	优势	劣势
化石燃料	天然气蒸汽重整		通过天然气与高温蒸汽反应生成合成气， 即氢气和一氧化碳的混合物。一氧化碳与水发生反应产生更多的氢	• 短期内全球最成熟和可用的技术 • 许多国家现有的原料基础设施 • 生产氢气的操作成本低，原料便宜	• 有温室气体排放，但使用碳捕获和存储技术（CCS）可以帮助减少碳排放
	气化煤		由煤与高温蒸汽和氧气在加压气化炉中反应生成合成气，并转化为气体成分	• 作为原料的煤极为丰富和经济实惠 • 能够提供除氢以外的低成本合成燃料 • 生产氢气的操作成本低，原料便宜	• 较高的温室气体排放，但CCS有助于减少碳排放 • 富含杂质，需要净化 • 更复杂，需要更高的初始资本投入
	烃类/原油产品热解	甲醇裂解/裂化 液氨裂解	含氢化合物高温热解制氢	• 较低的初始资本投入 • 较低的能源消耗	• 较高的温室气体排放，但CCS有助于减少碳排放
生物质（如薪柴、锯末、麦秸、稻 草等）	生物质气化/热解		类似于煤炭气化，将生物质转化为一氧化碳、二氧化碳、氢气和甲烷的混合物	• 环保且可持续发展 • 有潜力转化所有的有机物	• 产生的气体需要进一步的工艺来提取氢气 • 处理过程复杂，生产成本较高
电解	用电网内电力进行电解		电解是用电把水分解成氢和氧的过程	• 技术成熟 • 利用可再生能源进行的电解没有污染 • 所得氢纯度高，杂质含量低 • 适合多种条件下的制氢	• 高能源消耗 • 运行成本取决于电力来源 • 与发电来源有关的温室气体排放
	用风能/太阳能进行电解		电解是用电把水分解成氢和氧的过程	• 可收集非高峰时间的风能/太阳能 • 可再生、环保、可持续发展 • 是制氢的廉价能源	• 可以在未来更广泛采用这种方法制氢
	光解		利用太阳能在特定催化剂作用下直接光解水制氢	• 清洁可持续 • 原料丰富	• 尚处实验室阶段 • 转换效率低
	生物电解		由微生物产生氢化酶，并催化水的分解来产生氢	• 清洁且自身可持续发展 • 能适应不同的水环境	• 获取高效微生物 • 技术尚不成熟，预计将在中长期可用

图 74. 氢气生产效率和世界主要国家当前部署的氢气生产手段[245 246 254 255 261 263 264 265 266]



氢气生产途径	能源效率	氢气生产来源			氢气生产成本（美元/公斤氢气）		
		美国	中国	欧洲	美国	中国	欧洲
化石燃料-天然气（SMR）	68.0%-69.1%				1.3-2	1.8-2.6	1.9-2.7
化石燃料-煤炭（气化）	53.8%-55.9%				2.3-2.8	1.5-3.1	2.3-2.8
电解	23.4%-40.0%（利用电网电力电解，如果浪费的额外太阳能和风能能够被利用，理论上可以达到100%）				2.2-3.6	1.6-2.2	3.1-4.1

注释：制氢成本箭头方向为长期成本。对于天然气和煤炭生产的氢气，由于二氧化碳价格上涨，长期成本将增加。对于可再生能源电解制氢，长期成本将降低。

由于看好氢能未来的发展，世界各国都在致力于开发更可持续的制氢技术（图74）。例如，美国能源部燃料电池技术办公室发布了针对短期，中期和长期的氢气生产技术路线[255]。中期包含生物质气化和煤气化技术，而长期则侧重于太阳能气化技术。随着可再生能源的成本持续下降，利用风能和太阳能等可再生能源进行电解将是一种非常有发展前景的方式。[264]此外，光电解、生物电解等新兴技术正处于不同的研发阶段，有望在长期成为生产氢气的重要手段。

4.1.3 氢气的运输与储存

图75展示了氢的生产、运输和储存路径。本节将重点介绍运输和储存部分。

氢气运输的方式和成本与氢气的生产地点密切相关，可分为集中式式生产、半集中式生产和分散式生产[267]。集中式生产是指在大型的中央氢气生产厂生产，然后运输到最终加氢站，而分散式生产是指在加氢设施附近进行生产[268 273]。半集中式生产是指在距离使用点很近（40-161公里）的中型制氢设备（5,000-50,000公斤/天）进行生产。这些设施不仅可以提供一定程度的规模经济，而且可以最大限度地降低氢运输成本和基础设施[268]。由于氢气在中国仍属于危险化学品类别，目前中国还没有分散式制氢。

氢气运输的途径通常是基于氢气运输的各种物理状态而发展起来的。[267] 压缩气态氢通常是通过卡车/长管拖车或管道输送；液态氢通常由卡车或其他运输方式运输，如铁路或驳船。液体氢在长途运输中经常使用，因为它比气态氢运输方式更具经济性[272]。固态氢主要是在特定的容器中输送，但目前各地区仍处于不同的发展阶段，需要更多的技术改进才能形成大规模采用[278 279]。目前，通过长管拖车运输液态或气态氢和通过管道运输气态氢是三种主要的运输氢气的方法。[267]

在美国和日本，液氢运输被视为重要的运输方式，它适合中长途运输，500公里后运输成本大幅下降；然而，液氢能源消耗高（因此能效低）[274]。在中国，氢主要以压缩气体的形式输送。与用卡车运输液态氢气相比，它具有更高的能源效率，但仍低于管道输送[274]。通过管道运输氢气具有最高的能源效率和成本优势，但需要较大的前期投资[275]。随着氢能源产业的发展，管道有望成为未来大规模氢气运输使用率最高的方式[274]。三种主要氢气运输方式的运用现状及未来运用预测如图76所示。

氢的储存有三种主要方式：压缩气态氢、液态氢以及与金属或化合物发生吸收或反应而形成的固态氢，或者可以以其他化学形式储存。[271]然而，将氢冷冻至-250°C从而将其压缩成液体需要大量能量，在目前的技术下会导致约40%的能量损耗[230]。

气态氢储存是当今最成熟的储存技术，具有存储及取用快、能量损耗低的优点。[274] 固态氢的理论能源效率高于液态氢，低于气态氢，但其技术更加复杂，目前仍处于试验阶段。[274]

图75. 三种主要氢气运输方式的采用现状及未来采用预测[276]

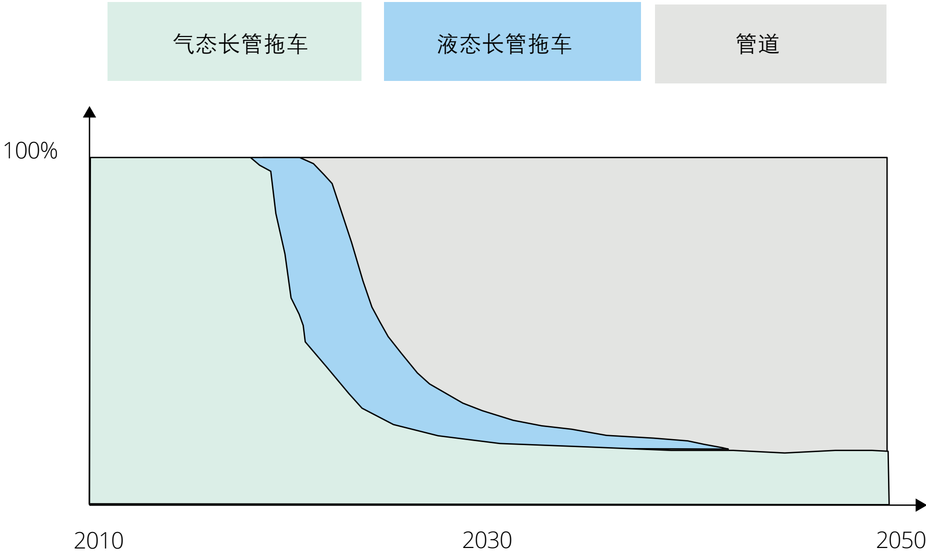
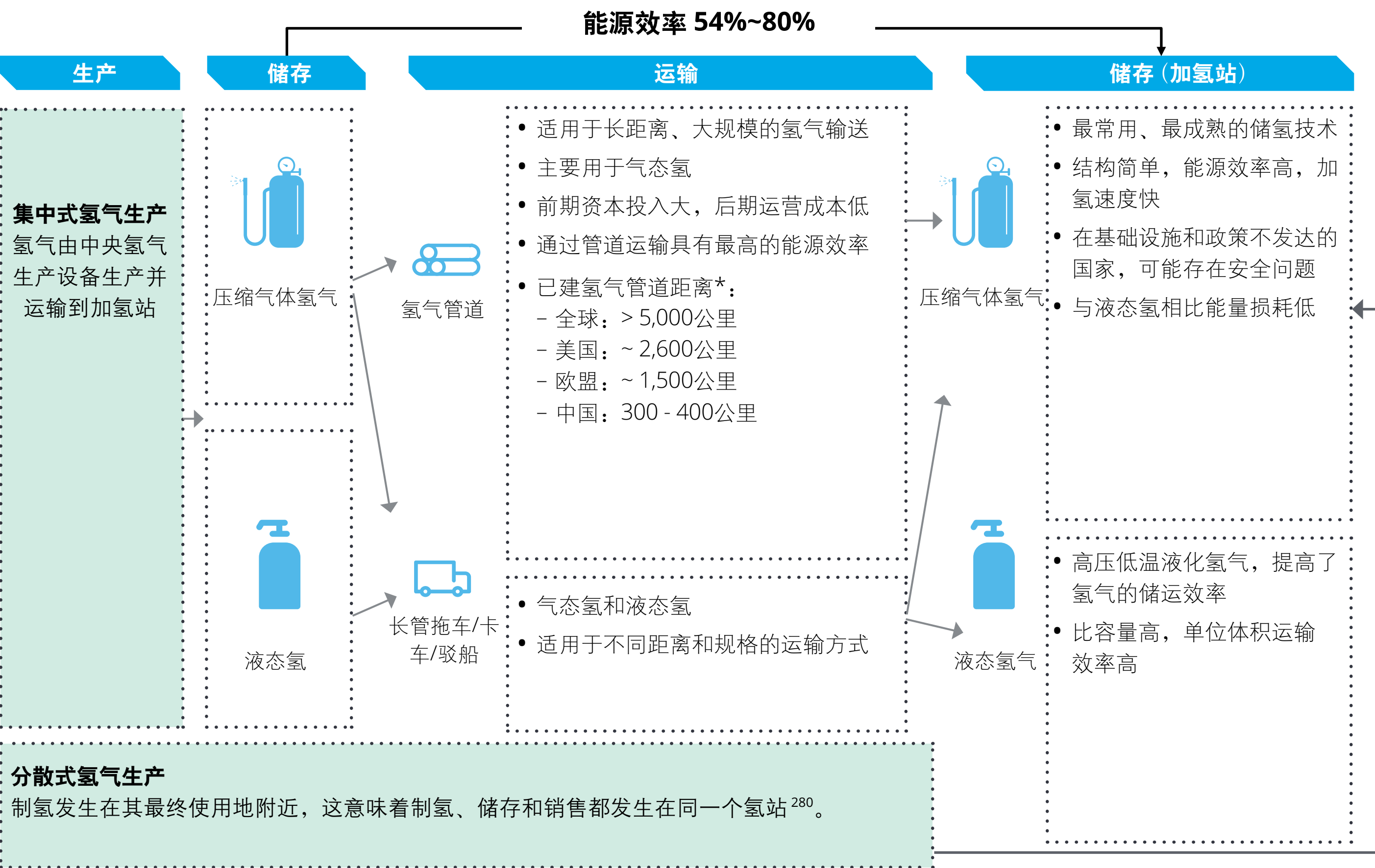


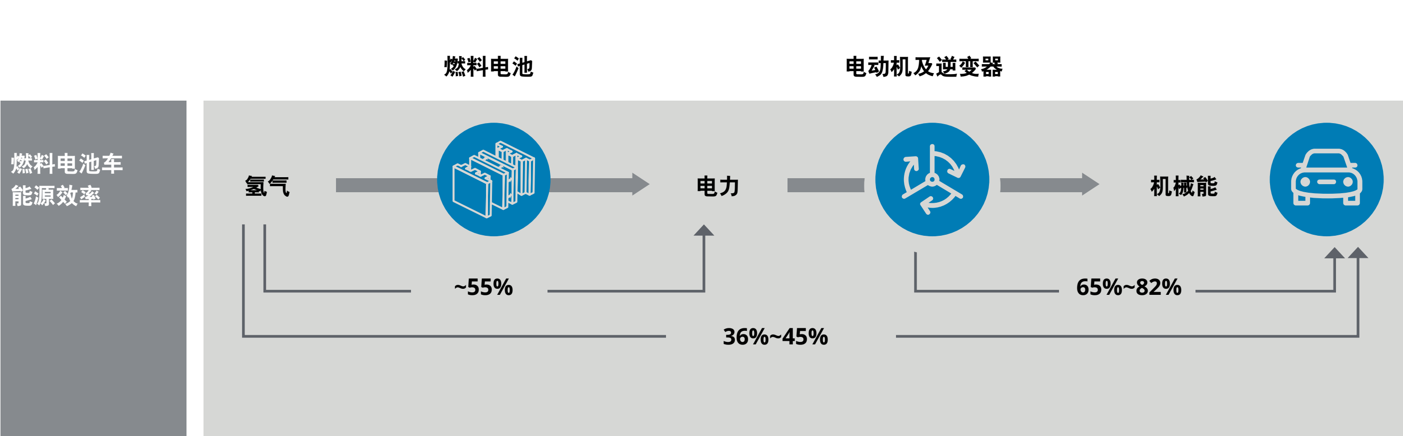
图76. 氢气生产，运输和储存途径



4.1.4 燃料电池的运行

燃料电池运行过程中，燃料电池车将燃料电池堆内的氢转化为电能，再将电能转化为机械功，如图77所示。这一过程的后半部分是由电机和逆变器完成的，在燃料电池车和纯电动车之间具有相同的能效。燃料电池车与纯电动车在能效上的差距主要是由氢转化为电能过程中产生的能量损耗造成的，约为45%-55%[229 230 232 277 242 94]。然而，随着技术的进步，未来可以从燃料电池中获取更多的能量并提供给车辆，这可能会将燃料电池的能量转换效率从55%提高到60%[94 242]。

图77. 燃料电池车从油箱到车轮阶段的能源效率



注释：*天然气管道不纳入考虑

4.2 环境影响的分析框架

在前一节中，我们介绍了氢的生产、运输和使用，以及燃料电池车每一步的能源效率。值得探讨的另一个维度是燃料电池车对环境的影响，这是一个高度复杂的话题。这不仅包括氢供应链的每一步，汽车的制造和报废也需要考虑进来。这些分析对于理解燃料电池车的整体环境影响至关重要，燃料电池车被誉为未来的绿色可再生运输解决方案。燃料电池车的整个生命周期温室气体排放如图78所示，我们将在接下来的几页中更详细地对其进行拆分。

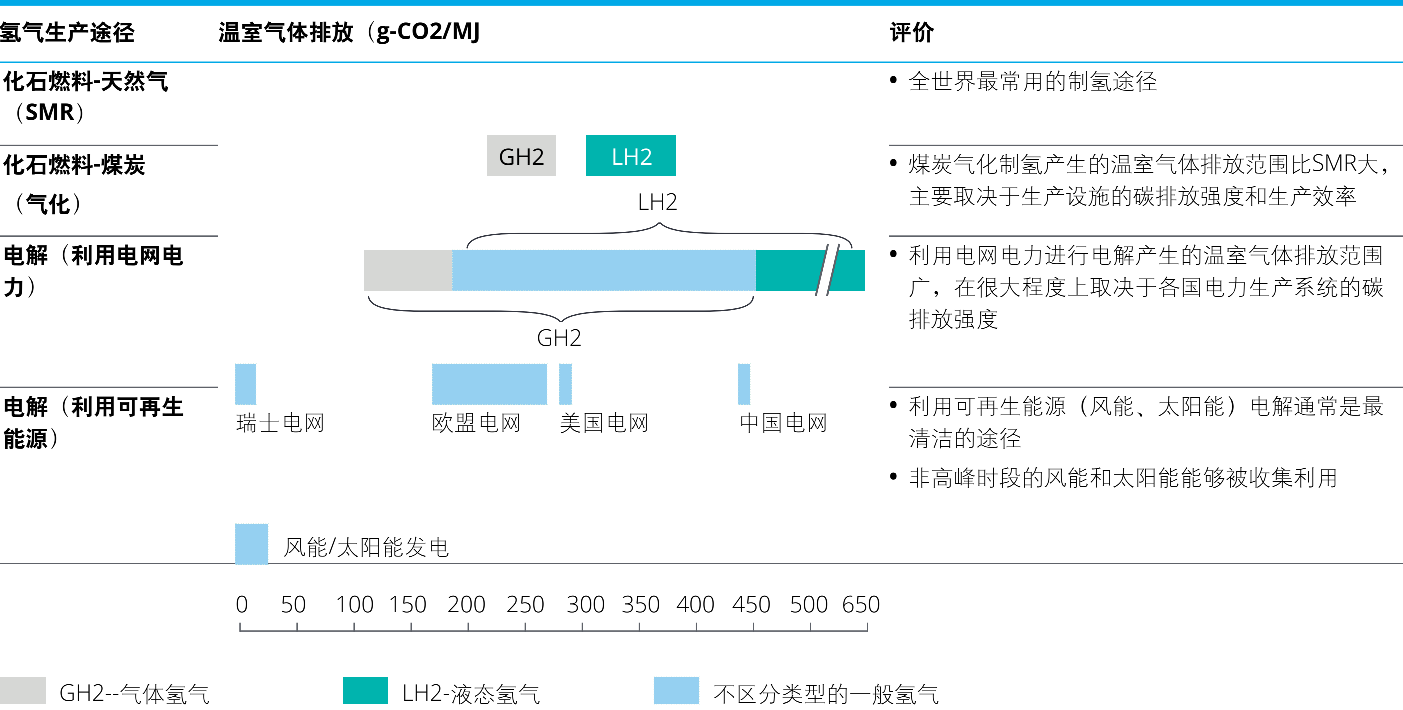
图 78. 车辆生命周期分析框架



4.2.1 “油井到车轮”（WTW）生命周期的环境影响

虽然氢燃料电池车一直被认为是一种绿色新能源汽车，在其运行过程中只会产生水，但是氢的生产、储存、运输和加氢的过程会产生温室气体，对环境造成影响。据氢能理事会统计，由天然气通过SMR制氢（油井到油箱阶段）的CO2排放量约为75 g/km，占燃料电池车生命周期CO2排放量的约60%。因此，制氢环节是保证燃料电池车低碳性能的关键环节[262 227]。由于能源效率和原料转化时温室气体排放的不同，不同制氢途径的总能耗和温室气体排放是不同的[262 273 281]。如图79所示，不同制氢途径的生命周期产生的温室气体排放是不同的：电网电解水制氢排放温室气体的范围最广，可再生能源电解水制氢最环保[282 284]。用美国电网的电力进行电解产生的氢消耗了相对较高的总能源和化石能源，并导致显著更高的温室气体排放。这在很大程度上是由于在美国占主导地位的燃煤电厂的相对低效率和高排放[273 283]。在中国也发现了类似的结果，用中国电网电力进行水电解产生的能耗最高，产生较多温室气体排放，而目前中国发电也以燃煤能源为主[262 266]。

图79. 不同制氢途径导致的温室气体排放的变化



燃料电池车和电动车在车辆运行过程中不会通过废气排放温室气体，然而发电和制氢过程会产生排放[287]。如图79所示，温室气体排放的变化取决于电力或氢气的来源[228 286 287 288 31]。

许多研究人员得出结论，燃料电池车产生的排放比传统汽车少，但也有些人认为，纵观其整个生命周期，燃料电池车并不是那么环保[285]。这取决于研究人员的研究视角，以及如何整体地考虑整个燃料车的生命周期。例如，在中国目前的电网结构下使用电解生产的氢气，无论是在能源消耗还是温室气体排放方面，燃料电池车都不比电动车或燃油车有更大的优势[262]。然而，由于以下因素，氢气制取环节的碳排放仍有降低可能性，为燃料电池车温室气体排放的减少提供了空间：

- 正如我们刚刚看到的那样，基于可再生能源的电力将大幅降低“油井到车轮”（WTW）整个生命周期中的温室气体排放。
- 在电力可能被浪费的情况下，氢气可以作为能量捕获的载体；例如，太阳能和风能发电受到季节性和高峰使用周期的影响，导致电力生产过剩;制成氢气能够捕获并储存这些浪费的电力，因此可以认为是负的温室气体生产[250 251 252]。
- 目前世界各地的电网结构仍有很大的改善空间，且各国都在投入大量精力改善电力生产；例如，根据中国氢联盟，到2050年，大约70%的氢将由可再生能源生产。
- 最后，正如我们在前一节中所看到的，电解制氢仅占制氢总量的4%；这与上述几点相结合，从温室气体排放的角度为未来制氢方式的改善指明了道路。



柴油车尾气排放



发电厂运营



可再生能源一览

4.2.2 生产制造阶段的环境影响

对于传统的石油驱动的燃油车，大约80%的生命周期温室气体排放和能源使用都与燃料在车辆运行过程中的燃烧有关[227 291]。然而，在电动车和燃料电池车的生命周期碳排放中，来自其制造和报废阶段处理环节的碳排放比例更高[227]。相较于燃油车的制造过程中的碳排放，电动车及燃料电池车的额外的碳排放主要来源于能量系统（即电池和燃料电池系统）制造，一方面电池及燃料电池用了许多金属材料，这些材料的挖掘及提炼就需要消耗许多能量，另一方面，能量系统的组装也产生了大量碳排放[326]。

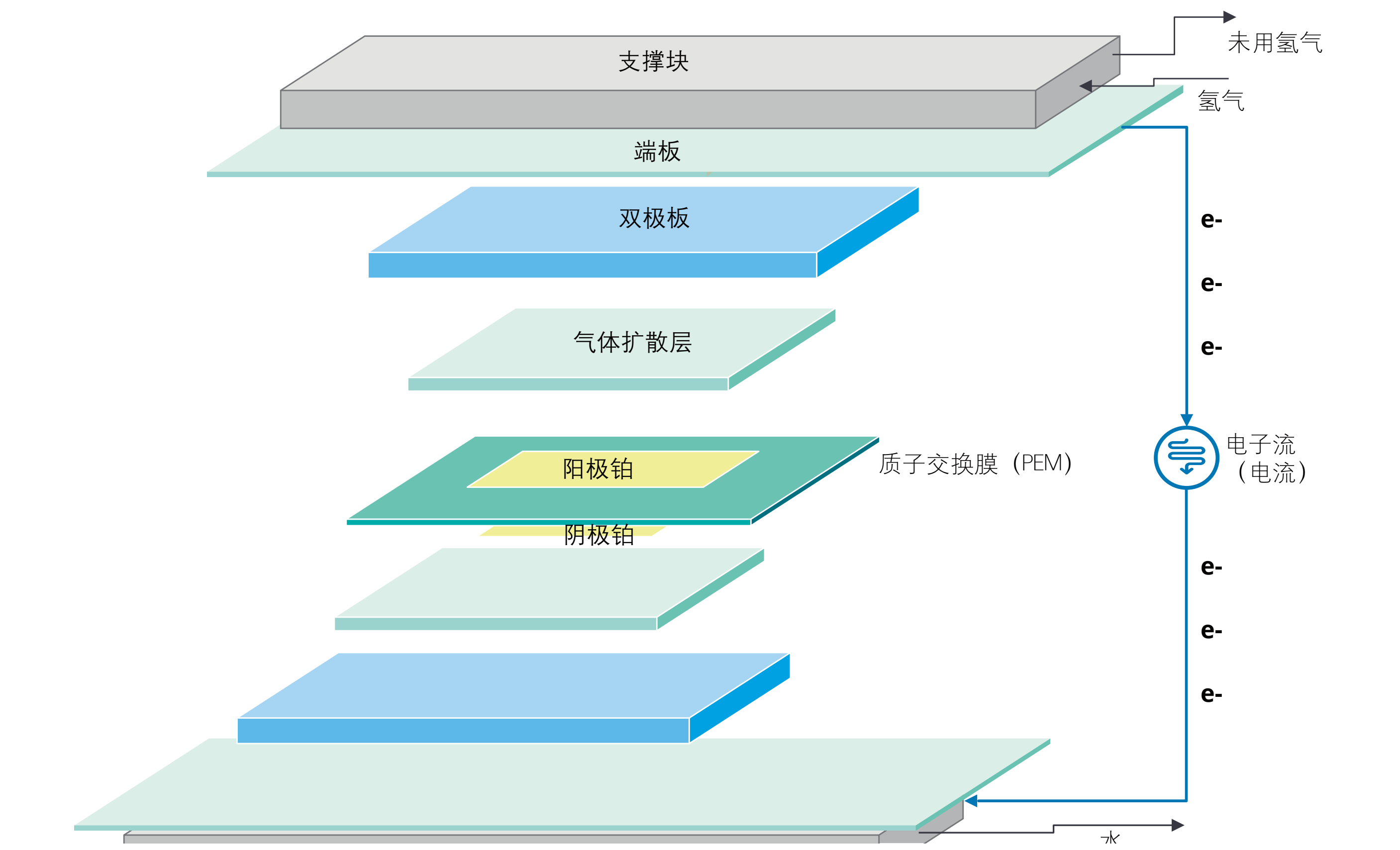
对于燃料电池车来说，虽然制氢对燃料电池车的能耗和温室气体排放起着关键作用，但燃料电池系统的制造过程也不可忽视。燃料电池系统制造过程中产生的碳排放约占燃料车生产及报废两个阶段碳排放的50%[326]。

如前所述，燃料电池系统由燃料电池组和其他支持部件组成。实际发生电化学反应的燃料电池堆由催化剂层、膜、气体扩散层、双极板等组成，如下图80所示。以质子交换膜燃料电池为例，铂被应用于催化剂层。对于大多数不了解的读者来说，使用铂金这种高成本的贵金属可能会引起对燃料电池车的一系列批评。此外，铂还会引起一系列的环境影响，例如在提取铂的过程中会产生硫氧化物的排放[248 289 290]。

然而，事实是燃料电池系统中铂的使用量非常小，而且还在不断减少。例如，燃料电池车中使用的铂约为每辆汽车10-20克[294]。这可以与燃油车的催化转换器相比较，后者对于类似大小的柴油车需要大约5-10克的铂[294]。此外，无铂催化剂也处于不同的发展阶段，如后面几页所示[246]。

此外，需要注意的是，燃料电池系统的大部分成本是相关的制造成本，而不是材料成本。事实上，最昂贵的材料——铂，估计仅占70kw燃料电池系统总成本的0.8%[295]。随着生产规模的扩大，国际能源署估计，如果将工厂生产规模从每年1,000台增加到10万台，燃料电池零部件的成本可以降低65%[246]。

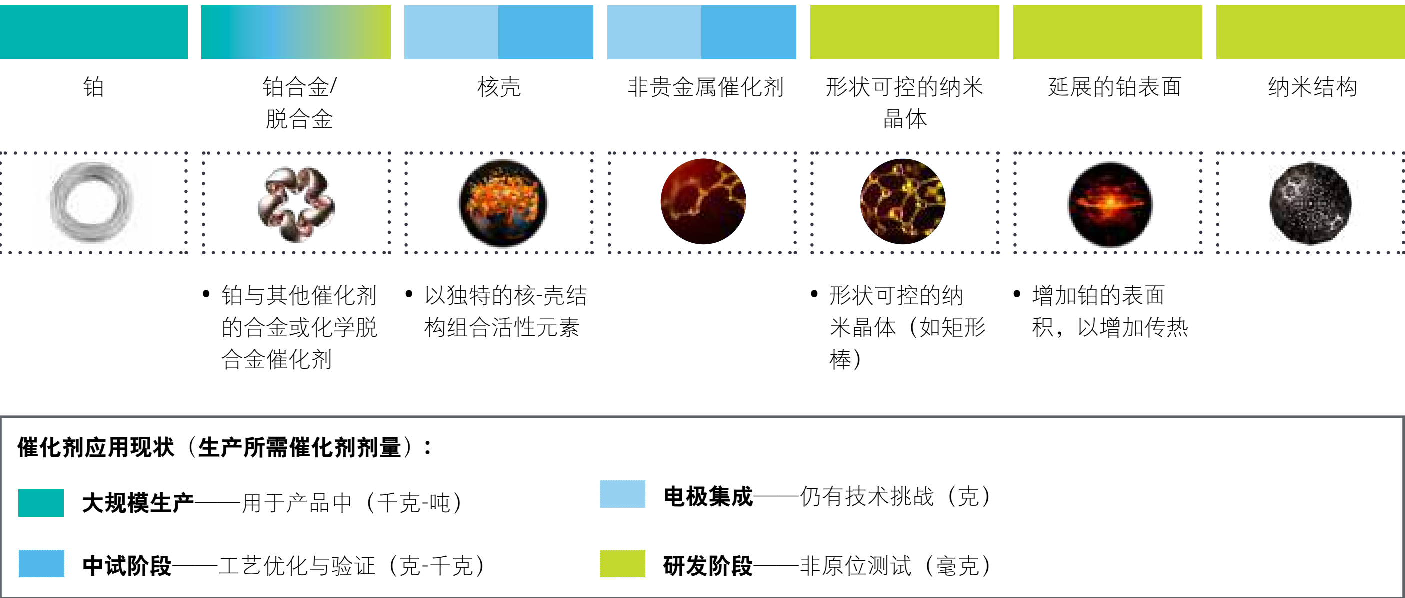
图80：燃料电池堆零部件和主要原材料



零部件	主要原料
催化剂层	铂 （0.2~0.4 g/KW）
膜	磺化四氟乙烯基的含氟聚合物共聚物
气体扩散层	碳
双极板	碳/金属
端板[292,293]	电镀金属

预计随着燃料电池系统研发的不断推进，铂在催化剂上的使用量将继续下降。各种各样有前途的其他催化剂也已经被开发出来，如图81所示。这些催化剂在实验室测试中表现出了异常的活性，并且处于不同的试点/研发进展[296]。

图81： 燃料电池可用的潜在催化剂及其应用现状











当提到电动车的时候，人们常常会误以为电动车不产生任何碳排放。在车辆运行时这是没有问题的，但如果考虑到电动车的生产制造就不是这样了，电动车的生产过程产生了大量的碳排放[327]。事实上，在生产制造阶段，相较于燃料电池汽车及燃油车，电动汽车的碳排放是最高的[326]。

首先，燃料电池车的材料使用和发展趋势与电动车有很大的不同。对于电动车，电池的材料成本占比有可能达到75%（如锂和钴[298 299]），因此电池的材料用量及成本未来不太可能以类似燃料电池系统的速度降低。

此外，电池的制造是电动车整个生命周期中产生最多温室气体排放的环节[228 297 286]。由于电池的制造需要提取和精炼稀土金属，涉及高热量和无菌条件，整个过程是能源密集型的[297 288]。在电池生产过程中，近50%的温室气体排放来自电池的组装和制造，其余一半主要来自原材料的开采、提炼和加工过程[228]。

而且开采和回收电池内的相关金属也增加了污染。例如，开采锂矿需要消耗大量的水。此外，锂矿开采过程中产生的有毒化学物质有可能从锂矿蒸发罐泄漏到供水系统中[300]。在回收方面，由于材料不能完全回收，未回收的锂和钴会造成重金属污染，增加环境PH值[301]。



锂矿开采



电池生产

金属供应安全性-铂

如前文所述，燃料电池车（铂）和电动车（锂和钴）在生产中需要使用贵金属。为了估计未来的价格趋势和大规模生产的可能性，我们对这些金属的供应安全性进行了分析。

首先，我们对燃料电池车的金属需求和供应情况进行了评估。如图82所示，在过去的几年中，铂的供应增长已经超过了需求。从供应角度来看，全球铂储备量估计为14,000吨（4.94亿盎司）[302]。在可预见的未来，铂的开采量有望保持稳定[294]。在铂回收方面，由于许多国家要求整车厂商对报废汽车负责，铂供应中越来越多的部分来自“地面上”-即来自回收的燃油车尾气催化剂中的铂，而非采矿。预计未来几年，回收将成为铂一个重要的供应渠道，提升铂的总体供应量。

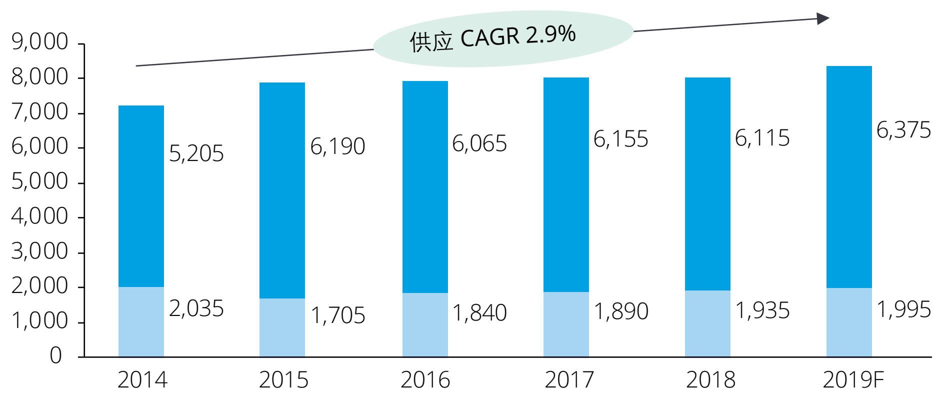
从需求的角度来看，由于投资和珠宝需求的下降，铂的总需求一直在下降[303]。如图83所示，铂金主要用于珠宝首饰、汽车、工业应用和投资[303]。随着珠宝首饰和投资的减少，铂在燃料电池中的使用得到了更多的空间。珠宝首饰需求从2014年到2018年下降了20%，投资需求从150 千盎司（以下简称koz）下降到2018年的15 koz[303]。

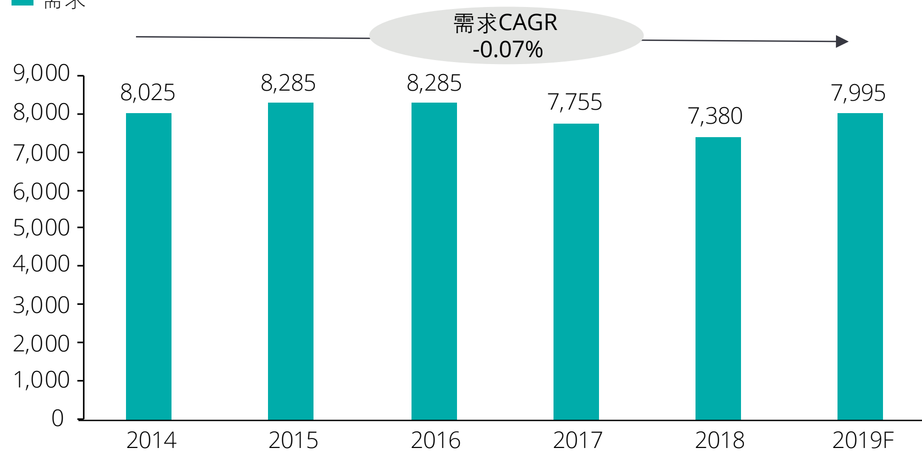
近年来，汽车中使用的铂稳定在3,100至3,500 koz之间，主要用于内燃机催化转化器，还有一小部分用于燃料电池[304]。据业内预测,如果燃料电池车的普及率在短期到中期达到4.5%,铂金作为燃料电池催化剂的全球需求将从目前的88koz增长到未来的接近2,280和2,660koz。假设每辆车分别含有12.5和17.5克铂[303 306]，如果珠宝等其他行业的需求没有显著增长，预计燃料电池车用铂不会出现短缺。

此外，随着燃料电池技术的发展，铂的使用在不断减少。目前，燃料电池催化剂中的铂含量已经降低到本田Clarity的0.12克/千瓦和丰田Mirai的0.175克/千瓦[304]。2015年我国燃料电池车催化剂的平均铂需求量约为0.4克/千瓦，预计2020年将降至0.3克/千瓦，2025年将降至0.2克/千瓦，2030年将降至0.125克/千瓦[305]。

综上所述，考虑到氢燃料电池车市场的发展，铂的供应将在短期和中期得到保证，能够满足需求的增长[304]。

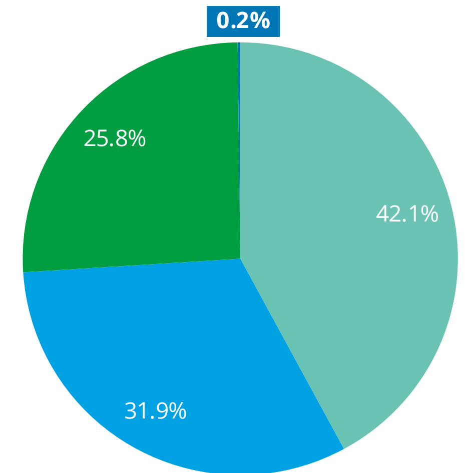
图82. 铂的全球供应与需求





数据来源：World Platinum Investment Council

图83. 2018年不同用途的铂金需求



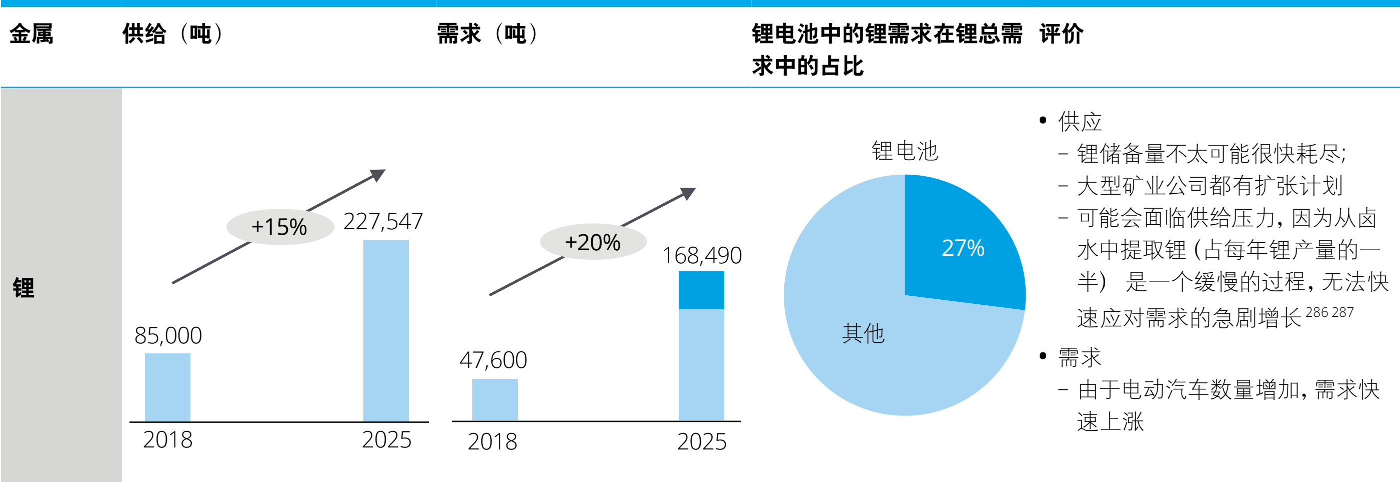
锂

锂是制造纯电动汽车必不可少的成分[307]。从供应的角度来看，目前的总储备量为1,400万吨，在智利、澳大利亚和中国等国家都有大量的储备量[307 309]。根据2019年矿产概要，2018年全球锂产量约为8.5万吨[309]。与此同时，随着未来几年锂产量的扩张，到2025年，锂的总供应量预计将达到227,547吨，这意味着充足的供应能力可以满足预期的需求增长[308]。

与此同时，锂的需求也在迅速增长。根据2019年矿产概要，2018年全球锂消费量约为47,600吨[309]，预计到2025年将增至约126,226 – 168,490吨[308]。锂主要用于电池、润滑脂、耐热玻璃和陶瓷。电动汽车所用锂约占锂总需求的27%[310]。

锂的供需明细如图84所示。总体而言，锂的供应在中短期内可以得到满足。然而，由于预计需求将超过供给，锂价格上涨或供应量短缺可能是未来的一个担忧。

图84. 锂的总体供需情况



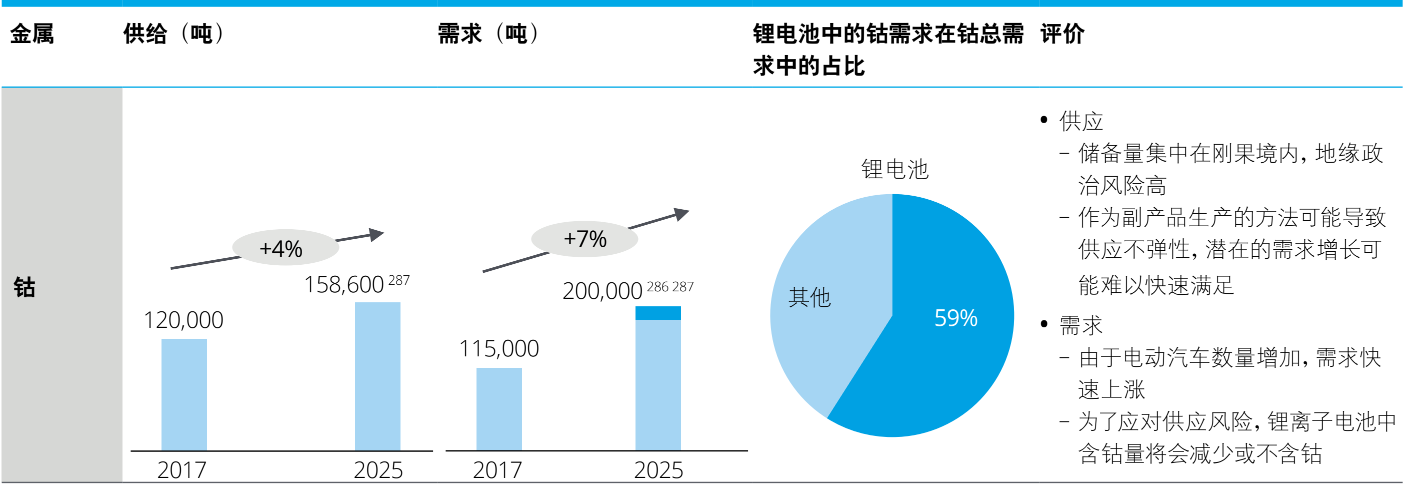
钴

在地壳中，钴是一种相对稀有的金属[228]。如图85所示，2017年全球钴产量约为12万吨，消费量约为11.5万吨[309,310]。然而，考虑到供应的高度不确定性，钴在未来面临特殊的挑战[311]。

钴的供应严重依赖于刚果（金），而刚果（金）的地缘政治风险很高。全球钴矿总储备量为690万吨，其中49%在刚果（金）[309]，该国供应了全球60%以上的钴矿产量[309,311]。由于这种地缘政治风险，钴被认为是一种“冲突金属”，因为它的开采地由武装组织控制[228]。这种情况在近期不太可能改变，并可能导致钴供应危机[311,312]。此外，钴的浓度通常较低，这意味着它主要是作为铜和镍等其它金属的副产品被开采出来的[309]。因此，铜或镍的价格通常决定了钴的开采量是否增加，导致钴供应缺乏弹性，开采的钴或许无法应对潜在的日益增长的需求[311]。

然而，钴在电动汽车的生产中是一种重要的材料。锂电池所用的钴约占钴总需求量的59%[310]。供应的不确定性将是电池生产商面临的一大挑战。为了解决这个问题，大多数汽车制造商和电池公司都在开发降低钴含量的锂电池新技术，一些公司甚至已经开始开发无钴电池[313]。然而，为了减少钴的使用量，电池制造商往往会增加镍的用量来维持电池的能量密度，这降低了电极材料的结构稳定性， 进而影响电池的寿命和安全性[311,313]。

图85. 钴的总体供需情况



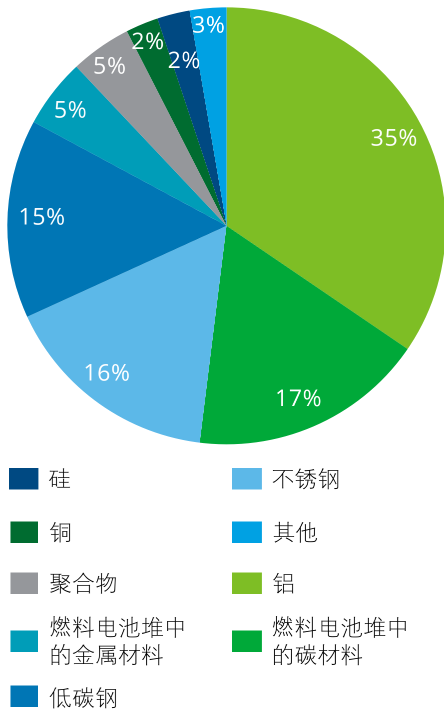
4.2.3 报废阶段的环境影响

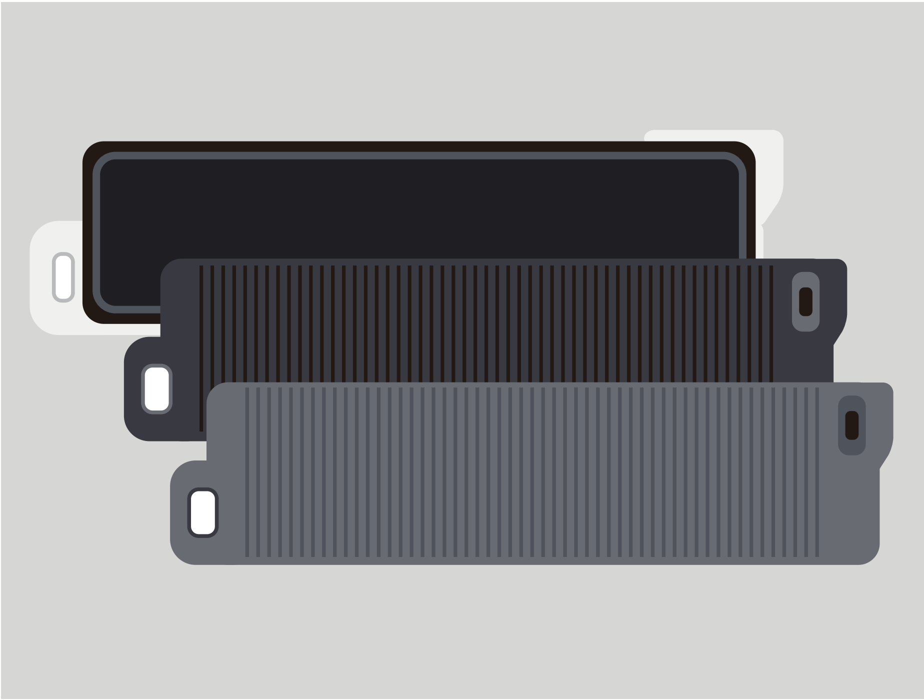
回收在报废阶段的环境影响评估中是最重要的一个话题。金属材料的污染及回收过程中的额外能量消耗是车辆报废阶段的主要负面环境影响。本节将着重于对燃料电池系统及电池的回收情况进行评估。值得一提的是，对于燃料电池及电池来说，如果其中的金属材料被很好的回收的循环利用的话，是有助于减少氢燃料车及电动车的总体碳排放量的[325]。一般来说，燃料电池车在报废阶段碳排放量是少于电动车的[326]。

目前，涉及到燃料电池系统的回收技术还处于初级阶段，图86对燃料电池系统中所用材料进行了拆分[94]，其中包含铂金在内的燃料电池堆所用金属材料占比较小，仅有5%。然而当前燃料电池中的材料一般不会大规模回收[314 316]。而传统的处理方法往往涉及燃烧或掩埋报废的部件，这又将造成严重的环境破坏和资源浪费[314]。因此，为了减少燃料电池车在整个生命周期中对环境的负面影响，除了通过采用更先进的制造技术和工艺减少燃料电池车制造过程中的温室气体排放外，减少燃料电池车处置过程中潜在的环境污染，通过回收利用降低关键材料的消耗是非常重要的[315]。

此外，尽管燃料电池中的铂金回收产业链尚不成熟，但值得一提的是，由于传统燃油车也会在尾气排放过滤装置中用到铂金作为催化剂，当前传统燃油车的铂金回收产业链已相当成熟。因此实际上现在回收燃料电堆中铂金的技术是已经存在的。如目前巴拉德动力系统公司就采用合适的回收技术，在燃料电池回收过程中回收了95%以上的贵金属[94]。此外，燃料电池堆中的碳双极板在翻新时可以重复使用。这不仅减少了对环境的影响，还有助于缓解对金属供应稳定的担忧。巴拉德目前每年回收利用数千个燃料电池堆，并将残余价值返还给客户[94]。

图86：燃料电池系统材料占比 (85kw)（按重量）[94]

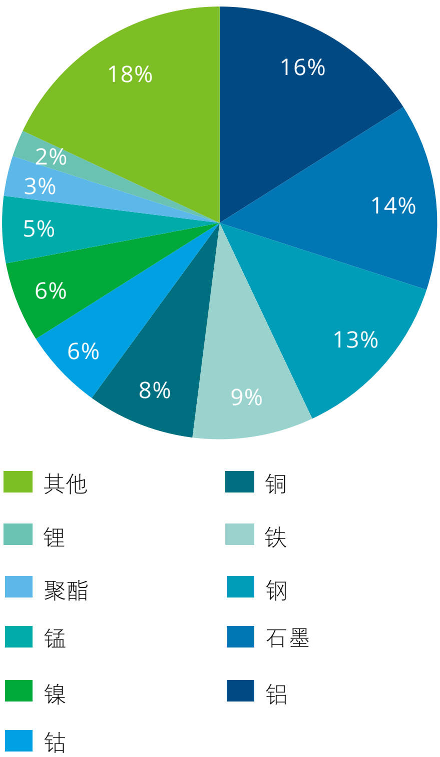




翻新、再利用和回收燃料电池零部件

电动车电池的报废是一个重要而复杂的话题，我们将仅对当前的概况进行介绍。电动车电池报废主要有3种方法，即再利用，回收和直接报废。 再利用和回收可以为电动车生命周期的其他阶段，尤其是原材料开采阶段，减少碳排放带来巨大好处[286]。 例如，通过提高再利用和再循环水平来改善废物管理并提高效率，可以减少电动汽车中大量使用贱金属（例如铜和镍）对环境引起的毒理性影响[286 318 319]。

图87： 典型电动汽车电池所含的材料拆分（按重量） [297 328 329 330 331 332 333]



锂电池可以重复使用，它在从车辆上卸下后仍保留了其一部分原始容量。 该电池可用于固定式电力存储，但最终电池仍将达到使用寿命，需要回收或处置[286 297 320 94]。对电池预期寿命和安全性的担忧阻碍了电池的重复使用。[320] 此外，随着新电池组价格的持续下跌，二手电池很难有经济价值上的优势。[320]

随着电动汽车行业的发展，电池回收也变得更加可行[297]。使用回收材料生产新电池可使整个电池生产过程的温室气体排放量减少50%[286 297 317]。图87显示了按材料分类的电动汽车电池的典型构成。目前，钴、镍和锂等贵金属回收具有最高的经济价值。然而，像铝、铜和石墨这样的材料由于较低经济效益而很少被回收[286 297]。

电动汽车电池的堆填处理是最不可取的报废处理方法[286]。不幸的是，因为正如我们刚刚展示的，重复使用和回收利用目前很少被使用，堆填成了对环境影响最糟糕但却最广泛使用的方法。[321 322 323]。

4.2.4 环境影响总结

总的来说，正如我们在4.2节中所展示的，与电动车和燃油车相比，燃料电池车在其整个生命周期中对环境的影响和温室气体排放是最低的：

- 与燃油车相比，在能源生产、运输和转换中较低的温室气体排放使得燃料电池车在整个生命周期中产生的碳排放低于燃油车
- 与电动车相比，氢燃料车生产及报废过程中的温室气体排放少，同时对环境有害的重金属材料使用量也更少

在实际应用中，氢燃料车的减排效果可能会非常显著。例如，与柴油卡车相比，通过SMR制氢的氢燃料电池卡车可以减少5%-26%的化石燃料消耗，以及20-45%的温室气体排放[324]。

正如我们之前所说，碳排放量减少的范围取决于各种因素，但最主要取决于采用何种制氢方式。 基于如下因素我们预计燃料电池车对环境影响未来将进一步减小：

- 如4.1节提到的那样，氢气来源的结构变化，如更多的采用可再生能源制氢，将有效减少燃料电池的碳排放
- 燃料电池系统生产技术的提高及金属材料用量的减少：当前燃料电池系统技术已经得到了很大的改进，未来技术的提升将有助于碳排放的进一步减少；与无法避免大量使用重金属的电动汽车相比，燃料电堆中的铂金使用量及燃料电池系统中的其他金属用量正在逐步减少。
- 燃料电池车在报废阶段中，无论是二次使用还是回收都有非常高的经济价值[228 286 297]。而电动车的回收与利用方面仍有很多困难需要克服。

总结与展望

氢不仅是宇宙中最丰富的元素，它还是核聚变的主要元素，为太阳提供能量，是地球上所有生命的基础。它也是自第一次工业革命以来推动商业、工业和生活水平提高的所有化石燃料中的一个关键元素。此外，与化石燃料相比，氢能在移动出行应用领域还有两个关键优势。一方面氢气具有清洁性，其通过氧化释放能量并只产生水作为副产品，另一方面氢气具有可持续性，只要太阳照常升起，它就能够无限可再生。

我们应该记住，地球上所有的能量都来自太阳的氢聚变过程。化石燃料是在地球历史漫漫长河中以无数动植物尸体作为太阳能承载载体最终储存下来的能源产物，是大自然慷慨而有限的馈赠。氢则不同，氢依靠太阳能及其他可再生能源如风力和水力等，可以达到无限再生。太阳时刻以每小时4.3垓（$4.3x10^{20}$）焦耳的速度向地球传递能量，这些每小时传递的太阳能可供整个地球使用一年以上。从传统能源向氢能源的转变其实也只是从提取存储在地下能量库的有限能量向实时利用从太阳传递而来的无限能量的转变。这种差异正是氢能源可持续性的本质。

毫无疑问，氢能将为地球的未来提供燃料，就如通它贯穿于地球的整个发展历史一样。本次研究工作的重点是找到最理想的机制来提取最大的能量，为移动出行各应用场景提供动能。 随着时间的流逝，氢能的使用已经并将会完成从作为内燃机燃料简单燃烧，到通过燃料电池直接发电再到最终可控的氢聚变的进化过程。

本次总共三部分的白皮书系列计划将在不断拓展丰富的内容背景下探索氢能源的发展。 由于氢在满足地球上日益增长的人口的出行需求方面已经起着越来越重要的作用，因此本部分白皮书主要着眼于眼下近期发展。 我们分析了当前技术和未来趋势的可行性以及现有应用方式及其对未来的影响，所有这些应用场景都采用了总拥有成本的方法进行分析，该方法将直接用氢气电解发电的氢燃料电池系统与其他能源系统进行了比较，包括以化石燃料驱动的内燃机和基于电池存储的电动系统（主要是锂电池）。我们探索了当前能源生态系统的许多方面，如关键技术的发展状况以及随着技术的发展在近期和中期预计得到的成本曲线，及各种可选能源系统的能量效率和全生命周期分析。

总而言之，通过本白皮书的分析，我们可以看到氢能是未来最有发展前景的能源之一。美国、中国、欧洲、日本等国家和地区已经认识到了这一趋势，并开始在氢能及燃料电池技术产业中大力投入。由于氢燃料车具有加氢速度快（类似于燃油车）、能量密度高（即和电池相比，燃料电池系统在提供相同的能量时，其重量会更轻）等特点，燃料电池车对于商用车，尤其是重卡，是非常合适的清洁车辆解决方案。我们也通过量化的方式证明了燃料电池车在未来将会比电动车及燃油车具有更高的经济性。总体来说，在燃料电池系统价格下降、生产规模的扩张、可再生能源在制氢过程中使用比例提升、及加氢基础设施逐渐完善等多个因素的驱动下，我们预计氢燃料车的TCO到2029年将下降50%。此外，和电动车及燃油车相比，燃料电池车的全生命周期温室气体排放量也是最低的，而随着可再生能源在氢气制取过程中使用比例不断提升，我们预计燃料电池的温室气体排放量将会进一步降低。

当政府领导人，企业家，学者和思想领袖思考人类面临的气候与污染挑战时，需要一个有效的研究分析的出现，能够从更宏大更全面的能源格局来分析当前交通出行对于能源的需求。现代化经济中出现的大量人口、不断快速增长的消费需求、及不断推进的城市化进程，这些都导致全球能源需求在不断急剧增长，但毫无疑问现有化石燃料的使用对气候的影响将更加严重。在本系列另外两卷即将出版的白皮书中，我们将在这样一种能源需求不断扩张的背景下探索氢能源发展。第2卷将更广泛地，不仅从交通出行场景，更从现代生活中每一种能源需求场景出发进行氢能源应用的研究。例如，探索未来固定式可再生氢能源系统的储存和管理将会如何与其在交通出行领域的应用产生协同作用等。

我们白皮书系列的最后一卷将探讨氢能源供应链，主要是聚焦在商业应用和技术发展方面。这将使氢气未来能够更系统地生产，储存，运输和分销给前两卷中探讨的那些复杂的终端用户。在这一部分，研究重点将再次集中在成本，激励措施和风险上。这些成本，激励措施和风险将影响未来氢能源的广泛应用。氢能源在一系列子系统中的商业可用程度将取决于对包括成本，激励措施和风险的综合计算。尽管我们处在非常早期的阶段，但在许多领域内，我们认为氢能源将是非常棒的解决方案却很少被实际应用。届时将会有充足的定性和定量信息让我们能够知道氢能源的运用不仅是可能，而是会成为一项必将被采用的方案。

氢能源在能源政策制定者、能源供应商和相关行业的技术公司的规划中占据重要位置。在像中国这样对未来发展有长远和明确规划的国家，氢能源已经是一个重要的话题。如今的全球技术和经济竞争正在驱使着高效能源解决方案的不断创造和部署。但除此之外应对气候变化更是重中之重，而这显然将是我们这一代人面临的最重要的使命。即使乍一看以氢能源作为一种交通工具能源已经是毫无争议的整体解决方案中的一部分，但如果没有清醒地认识到政府和企业所采取和追求的潜在经济激励措施，那么任何关于应对气候变化的反思都是无益且不现实的。同样重要的是，在这种情况下，氢能源在全球范围内并不是将绿色能源转化为交通出行动力的唯一解决方案。相反，它同电动车和其他新兴技术一样都是解决方案的一部分。经验丰富的读者可能会注意到，本文中提到的所有政府都为许多不同类型的绿色能源解决方案提供了政策激励——未来的出行生态系统很可能由不同的技术提供动力，这取决于实际应用案例、消费者需求和基础设施发展水平。

我们在本卷中验证了从短期和中期来看，在移动出行领域的各种商业应用场景中，目前已被应用到多种交通方式中的燃料电池技术已经将会至少等同于甚至比电动车和燃油车更划算。这种情况在不同地区的多个应用场景中得到了很好的支撑。从总拥有成本的角度来看，这三种动力方式都有很大的改进空间，但是燃料电池车的发展曲线在短期和中期都有明显的改善。虽然相比电动车和传统燃油车，这还处在一个相对较初始的发展阶段，但世界各地交通运营商已经感受到了燃料电池车的好处。此外，我们已经证明燃料电池车在整个生命周期中比电动车和燃油车更清洁、更环保。随着氢气生产在可再生能源发展中发挥更广泛的作用，氢燃料电池车的环境影响一定还会有更多的改进。

我们期待着在本系列的下一卷白皮书中与读者一起继续探索这个迷人的话题。

参考文献

1. Wattfuelcellcom. 2019. what-is-a-fuel-cell. Available from: https://www.wattfuelcell.com/portable-power/what-is-a-fuel-cell/
2. Rosen, M.A. & Koohi-Fayegh, S. Energ. Ecol. Environ. (2016) , The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s40974-016-0005-z
3. Thought Co. A History of the Automobile. Available from: https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932
4. Florida Solar Energy Center. (n.d.). Hydrogen Basics. Available from: http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/index.htm
5. Hydrogenicscom. 2019. Hydrogen Technology. Available from: https://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology
6. Machineryequipmentonlinecom. 2016. Electrical power generation. [Online]. [12 August 2019]. Available from: http://machineryequipmentonline.com/electrical-power-generation/fuel-cellsfuel-cell-principle/
7. Myautotime, Hydrogen in internal combustion engines. Available from: https://chejiahao.autohome.com.cn/info/3340139/
8. Science & Technology Review (2017), Fuel cell drive the future
9. DOE Hydrogen Program (2006), Hydrogen fuel cells fact sheet
10. H. Ren, J. Chae, in Wireless MEMS Networks and Applications, 2017. Fuel cells technologies for wireless MEMS. Available from: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proton-exchange-membrane-fuel-cells
11. Fuelcelltodaycom. 2019. About Fuel Cells. Available from: http://www.fuelcelltoday.com
12. GM Heritage Center. Available from: https://history.gmheritagecenter.com/wiki/index.php/1966_GM_Electrovan
13. ZHAO, YANG, &GAO, Major countries and energy companies around the world are accelerating the distribution of hydrogen energy industries. Available from: http://www.famens.com/news-355055.html
14. Fuelcelltoady.com, History. Available from: http://www.fuelcelltoday.com/history
15. Fuel Cell Vehicle Technologies, Infrastructure and Requirements, Electric Vehicle Transportation Center, 2017. Available from: https://www.pnas.org/content/pnas/suppl/2019/02/20/1804221116.DCSupplemental/pnas.1804221116.sapp.pdf
16. Leonardo Giorgi, and Fabio Leccese, Fuel Cells: Technologies and Applications
17. Honda joins U.S. partnership to popularize fuel cell electric vehicles. Available from: https://www.autonews.com/article/20130531/OEM05/130539981/honda-joins-u-s-partnership-to-popularize-fuel-cell-electric-vehicles
18. Adam Rubenfire, IAEA, Country Nuclear Power Profiles-Japan. Available from: https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Japan/Japan.htm; Japan, Strategic Energy Plan. Available from: https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/pdf/4th_strategic_energy_plan.pdf
19. H. Ren, J. Chae, in Wireless MEMS Networks and Applications, 2017. Fuel cells technologies for wireless MEMS. Available from: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proton-exchange-membrane-fuel-cells
20. theguardiancom, Germany-launches-worlds-first-hydrogen-powered-train. Available from: https://www.theguardian.com/environment/2018/sep/17/germany-launches-worlds-first-hydrogen-powered-train
21. International hydrogen fuel cell association (2017), Overview of Fuel Cell Vehicle Development in China.
22. DOE, Timeline of Events: 2003. Available from: https://www.energy.gov/management/office-management/operational-management/history/doe-history-timeline/timeline-events-6
23. Monica NAGASHIWA, Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications. Available from: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf
24. Agency for Natural Resources and Energy, Summary of the Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. Available from: https://www.meti.go.jp/english/press/2014/pdf/0624_04a.pdf
25. National development and reform commission and the national energy administration (2016 issued), Energy technology revolution and innovation action plan (2016-2030).
26. 2019 China Government Work Report
27. Kevin Guo, Deloitte China National Leader, Energy, Resources, and Industrials ("ER&I")
28. Expert Interview with Current Vice Minister Of Technology from China Association of Automotive Engineering
29. China Society of Automotive Engineering, Blue book of hydrogen fuel cell vehicle, Annual report on global hydrogen fuel vehicle 2018

30. Automotive business review (June 2019), China, the United States, Japan and South Korea hydrogen energy and fuel cell policy comparison
31. China Hydrogen Alliance (2019), China's hydrogen energy and fuel cell industry white paper
32. Guotai Junan Securities Research, Japan's hydrogen strategy and the advent of the fuel cell era
33. Eu-Japan Centre For Industrial Cooperation, Hydrogen technology market in Japan
34. FCH, Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition. Available from: https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition
35. DOE, H2@Scale. Available from: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale
36. United State Department of Energy, Hydrogen Fueling Infrastructure Development. Available from: https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_infrastructure.html
37. California Air Resources Board, Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development 2019. Available from: https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/annual-hydrogen-evaluation
38. TOYOTA, Port of Los Angeles Preliminarily Awarded $41 Million from California Air Resources Board to Launch Zero Emissions Hydrogen-Fuel-Cell-Electric Freight Project. Available from: https://pressroom.toyota.com/pola-preliminarily-awarded-41m-calif-air-resources-board-launch-zero-emissions-hydrogen-fuel-project/
39. H2 MOBILITY, We are building the filling station network of the future. Available from: https://h2.live/en/h2mobility
40. Zijian Zhen (2015), Analysis of Japanese fuel cell vehicle industrialization technology and strategic roadmap
41. United State Department of Energy, EERE Timeline. Available from: https://www.energy.gov/eere/timeline/eere-timeline
42. International Partnership for Hydrogen and Fuel cells in the Economy. Available from: https://www.iphe.net/
43. DoE (January 2018), State of the States: Fuel Cells in America 2017
44. California Fuel Cell Partnership, FCEV Sales, FCEB, & Hydrogen Station Data. Available from: https://cafcp.org/by_the_numbers
45. California Fuel Cell Partnership, The California fuel cell revolution. Available from: https://cafcp.org/sites/default/files/CAFCR.pdf
46. California Fuel Cell Partnership, MEDIUM- & HEAVY-DUTY FUEL CELL ELECTRIC TRUCK ACTION PLAN FOR CALIFORNIA. Available from: https://cafcp.org/sites/default/files/MDHD-action-plan-2016.pdf
47. Automotive Business Review, California Hydrogen Fuel Vehicle Promotion Case Act and Preferential Policy, Available from: https://www.xianjichina.com/special/detail_401119.html
48. Chief Observation of Hydrogen Energy, 2019 Evaluation Report on the Development of Fuel Cell Vehicle and Hydrogen Station Network in California. Available from: https://baijiahao.baidu.com/s?id=1640894537845881332&wfr=spider&for=pc
49. Congress.gov, A resolution designating October 8, 2015, as "National Hydrogen and Fuel Cell Day". Available from: https://www.congress.gov/bill/114th-congress/senate-resolution/217/text?q=%7B%2522search%2522:%5B%2522hydrogen%2522%5D%7D&resultIndex=1
50. Huatai Securities, Forklift Truck, the Frontier Field of Fuel Cell Vehicles
51. The Fuel Cell and Hydrogen Infrastructure for America Act of 2012. Available from: https://www.blumenthal.senate.gov/imo/media/doc/Fuel%20Cell%20and%20Hydrogen%20Infrastructure%20for%20America%20Act%20-%20Summary.pdf
52. Executive office of the President of the U.S., THE ALL-OF-THE-ABOVE ENERGY STRATEGY AS A PATH TO SUSTAINABLE ECONOMIC GROWTH. Available from: https://scholar.harvard.edu/files/stock/files/all_of_the_above_energy_strategy.pdf
53. DOE, National hydrogen roadmap. Available from: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/national_h2_roadmap.pdf
54. Congress.gov, Spark M. Matsunaga Hydrogen Research, Development, and Demonstration Act of 1990. Available from: https://www.congress.gov/bill/101st-congress/senate-bill/639/text
55. PUBLIC LAW 104–271—OCT. 9, 1996, HYDROGEN FUTURE ACT OF 1996. Available from: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_future_act_1996.pdf
56. U.S. Government Accountability Office (GAO), Hydrogen Fuel Initiative: DOE Has Made Important Progress and Involved Stakeholders but Needs to Update What It Expects to Achieve by Its 2015 Target. Available from: https://www.gao.gov/products/GAO-08-305
57. DOE, & Department od transportation, Hydrogen posture plan. Available from: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan_dec06.pdf
58. Harbin Institute of Technology (2018), China's Innovation Alliance for Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry
59. Sinolink Securities, Hydrogen and fuel cell industry Series Research 8
60. European Planning Studies, Hydrogen and Fuel Cell Development in China: A Review
61. Auto Business Review, China Hydrogen Refueling Station. Available from: www.sohu.com/a/318205275_115873
62. Measures to promote the construction and operation of hydrogen refueling station and the operation of hydrogen fuel cell vehicles in Nanhai district, Foshan city (interim)
63. Mao ZongQiang, Vice president of the International Hydrogen Energy Association and Professor of Tsinghua University, Speech “Hydrogen energy -- guarantee of China's energy security”

64. China Association Of Automobile Manufacturers, Sales Statistics of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Available from: http://mini.eastday.com/a/190114101916776-2.html
65. He Guangli, CNN Energy, National Institution of Clean and Low Carbon Energy, Analysis of China hydrogen and fuel cell technology development (May 2019). Available from: http://dy.163.com/v2/article/detail/EIFAS2VI0511E624.html
66. NDRC "Implementation Plan on Improving Circular Economy of Automobiles and Other Electronic Products" (2019-2020) Draft for Comment
67. FCH2JU, Who we are. Available from: https://www.fch.europa.eu/page/who-we-are
68. NOW website, About NOW. Available from: https://www.now-gmbh.de/en/
69. NOW website, National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP). Available from: https://www.now-gmbh.de/en/national-innovation-programme
70. Federal Ministry of transportation and digital infrastructure, &Federal Ministry of economic affairs and energy, Evaluation of the National Innovation Program Hydrogen and Fuel Cell Technology Phase 1. Available from: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20180126-bericht-evaluierung-nip-1/now_nip-evaluation-summary_web.pdf
71. H2stations.org, the 11th Annual Evaluation Report Of The Global Hydrogen Station
72. E4tech and Element Energy, Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth: A Roadmap for the UK. Available from: http://www.e4tech.com/wp-content/uploads/2016/11/UKHFC-Roadmap-Final-Main-Report-171116.pdf
73. Enrique Girón, JIVE & FC Bus projects. Available from: http://eliptic-project.eu/sites/default/files/PARALLEL_1_JIVE_Enrique%20Giron.pdf
74. Iflscience, Toyota To Follow In Tesla's Footsteps By Releasing Its Fuel-Cell Patents (2016). Available from: http://www.iflscience.com/technology/toyota-follow-tesla-s-footsteps-releasing-its-fuel-cell-patents/
75. China Society of Automotive Engineering, Blue book of hydrogen fuel cell vehicle-Annual report on global hydrogen fuel vehicle 2018
76. Fu Yingwei, China's Hydrogen FCEV Industry Buds to Bloom. Available from: https://equalocean.com/auto/20190410-chinas-hydrogen-fcev-industry-buds-to-bloom
77. Reuters, Toyota to supply 100 hydrogen-powered busses for 2020 Tokyo Olympics: 1,000 more for the Beijing Winter games. Available from: https://www.financialexpress.com/auto/car-news/toyota-to-supply-100-hydrogen-powered-busses-for-2020-tokyo-olympics-1000-more-for-the-beijing-winter-games/1709534/
78. Fuel cell today, Using fuel cell in residential heat and power. Available from: http://www.fuelcelltoday.com/media/1637150/using_fc_residential_heat_and_power.pdf
79. University of central Florida (Dr. Nan Qin, Dr. R. Paul Brooker, Dr. Ali Raissi). Fuel Cell Vehicle Technologies, Infrastructure and Requirements
80. Roosa, Stephen A. , Sustainable Development Handbook (2008)
81. Matt Ross, Bosch to cooperate in large-scale production of fuel cells (2019)
82. Hydrogen Council, Hydrogen scaling up (2017)
83. Ofweek, Summary of Fuel Cell Sales in China in the First Half of 2019. Available from: http://www.sohu.com/a/329546644_120066283
84. Ofweek, Analysis of China's Fuel Cell Vehicle Production in 2018. Available from: https://www.ofweek.com/hydrogen/2019-01/ART-180827-8440-30299375.html
85. Ofweek, Report on the Development of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry in China. Available from: https://libattery.ofweek.com/2018-05/ART-36001-8420-30233387.html
86. CHIC, Clean Hydrogen in European Cities (2010-2016). Available from: https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/chic-clean-hydrogen-european-cities-2010-2016
87. Finance Union, By 2020, China will have a target of 14.6 million fuel cell vehicles. Available from: http://www.china-nengyuan.com/news/141083.html
88. Element energy, Emerging Conclusions 2. H2ME projects overview. Available from: http://h2me.eu/wp-content/uploads/2018/11/H2ME_Emerging-Conclusions-_project-overview.pdf
89. Everbright Securities, Panorama of Hydrogen Station Construction in China. Available from: http://www.escn.com.cn/news/show-758167.html
90. Guotai Junan "Investment Opportunities of Automobile Components from the Perspective of Total Market Sizing and Structure Opportunities"
91. EEworld "FCEV System and Components"
92. Eastday "Why fuel cell is mixing power"
93. Deloitte "The Future of the Automotive Value Chain-Supplier Industry Outlook 2025"
94. expert interview with Ballard
95. Lan Wright, Tesla shouldn't introduce electric heavy trucks. Available from: http://www.sohu.com/a/206222952_722157
96. RAY, Comparison of Fuel Cell and Lithium Battery Management System. Available from: https://www.sohu.com/a/153362561_467757
97. X technology, A Fuel Cell Tail Exhaust System production method. Available from: http://www.xjishu.com/zhuanli/59/201710272688.html

98. DOE OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, Fuel Cell Technologies Office, Fuel cell system

99. GreenWheel, Fuel Cell System and FCEVs Components. Available from: http://ddc.greenwheel.com.cn/ddqcdc/car-3120.html

100. SITI NAJIBAH ABD RAHMAN1, PORTABLE PEM FUEL CELL SYSTEM: WATER AND HEAT MANAGEMENT (Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on SOMCHE 2015, July (2016) 102 – 116)

101. HUA, Fuel cell details. Available from: https://tech.hqew.com/fangan_391169

102. Lu Yaozu, "Structure and Principle of Internal Combustion Engine"

103. Josh Goldman, Comparing Electric Vehicles: Hybrid vs. BEV vs. PHEV vs. FCEV, Union of Concerned Scientists. Available from: https://blog.ucsusa.org/josh-goldman/comparing-electric-vehicles-hybrid-vs-bev-vs-phev-vs-fcev-411

104. Christopher Lampton, How Electric Car Batteries Work. Available from: https://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/vehicles/electric-car-battery3.htm

105. Blueridge energy, Nuts and Bolts of Battery Electric Vehicles (BEVs). Available from: https://www.blueridgeenergy.com/residential/powerful-solutions/ev-info-and-charging/bev-nuts-and-bolts

106. Dongxiao Wu, Jin Ren, Huw Davies , Jinlei Shang and Olivier Haas, Intelligent Hydrogen Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles

107. US DOT Federal Highway Administration (FHWA) Vehicle Inventory and Use Survey (VIUS) standards

108. Tractor & Construction Plant Wiki, Truck classification. Available from: https://tractors.fandom.com/wiki/Truck_classification#cite_note-1

109. IEA-RETD, Non-individual transport – Paving the way for renewable power-to-gas (RE-P2G). Available from: http://iea-retd.org/wp-content/uploads/2016/07/201607-IEA-RETD-RE-P2G-final-report.pdf

110. Toby Gooley, Almost ready for takeoff? Available from: http://www.dcvelocity.com/articles/20141230-almost-ready-for-takeoff/

111. UK Government, Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target

112. HYUNDAI website, Fuel cell model. Available from: https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx

113. IEA, Global Outlook and Trends for Hydrogen

114. carsalesbase.com, Sales data. Available from: http://carsalesbase.com/

115. Yoko Kubota, Toyota's Fuel-Cell Car Mirai Goes on Sale. Available from: https://blogs.wsj.com/japanrealtime/2014/12/15/toyotas-fuel-cell-powered-mirai-hits-showrooms/

116. Hydrogeit, Fuel cell carsharing – fleet operators go electric. Available from: https://www.h2-international.com/2018/03/06/fuel-cell-carsharing-fleet-operators-go-electric/

117. fuelcellsworks, clevershuttle-and-toyota-achieve-1000000-kilometers-hydrogen-fuel-cell-milestone. Available from: https://fuelcellsworks.com/news/clevershuttle-and-toyota-achieve-1000000-kilometers-hydrogen-fuel-cell-milestone/

118. Glen White, Toyota and Honda introduce fuel-cell vehicles at the LA Auto Show. Available from: https://www.manufacturingglobal.com/technology/toyota-and-honda-introduce-fuel-cell-vehicles-la-auto-show

119. Shell, Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2

120. Station of commercial vehciles, The "hydrogen" wind is blowing all over the country-the operation of hydrogen-fueled buses. Available from: https://baijiahao.baidu.com/s?id=1627716839398093319&wfr=spider&for=pc

121. Leslie Eudy and Matthew Post, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2018

122. Element Energy Limited, Strategy for joint procurement of fuel cell buses

123. Mark Kane, Toyota Introduces Production Hydrogen Fuel Cell Bus Sora. Available from: https://insideevs.com/news/337433/toyota-introduces-production-hydrogen-fuel-cell-bus-sora/

124. Shanghai Zhengfei Electronic Technology Co., Ltd., "Comparison of Development of Hydrogen Fuel Vehicles between China and Foreign Countries". Available from: http://www.chem17.com/st319339/article_1566419.html

125. Eastmoney, Listed Company reply. Available from: http://guba.eastmoney.com/news,000723,785519280.htm

126. How to replicate STNE experience to national logistics industry? Available from: https://baijiahao.baidu.com/s?id=1621727537872113800&wfr=spider&for=pc

127. DHL and StreetScooter develop new fuel cell electric panel van; DHL orders 100 units, https://www.greencarcongress.com/2019/05/20190525-dhl.html

128. Fuel Cell Hybrid Electric Delivery Van Project 2017 DOE Annual Merit Review

129. Hydrogen Vehicles in Urban Logistics: A Total Cost of Ownership Analysis

130. The Business Case for Fuel Cells: Delivering Sustainable Value

131. California Air Resources Board, Advanced Clean Truck Workgroup Meeting

132. Prospects for Global Truck Electrification and Autonomy and New Delivery Models. Available from: https://www.energypolicy.columbia.edu/research/global-energy-dialogue/prospects-global-truck-electrification-and-autonomy-and-new-delivery-models

133. Toyota, Nikola and Shell Seek Fuel Cell Truck-Fueling Standards. Available from: https://www.trucks.com/2019/02/21/toyota-nikola-hydrogen-truck-fueling/

134. Gmauthority, China Urges Hydrogen Fuel-Cell Development. Available from: http://gmauthority.com/blog/2019/07/china-urges-hydrogen-fuel-cell-development/

135. loomberg, China's Hydrogen Vehicle Dream Chased With $17 Billion of Funding. Available from: https://www.bnnbloomberg.ca/china-s-hydrogen-vehicle-dream-chased-with-17-billion-of-funding-1.1279847

136. Eastmoney, "Ballard introduced 500 fuel cell trucks in Shanghai". Available from: http://guba.eastmoney.com/news,002733,747008558.html

137. Sohu, "Toyota cooperate to develop fuel cell light and medium-duty truck". Available from: http://www.sohu.com/a/164994722_622515

138. Marketscreener, Plug Power Inc : $3M for Plug Power's Range Extender. Available from: https://www.marketscreener.com/PLUG-POWER-INC-10490/news/Plug-Power-Inc-3M-for-Plug-Power-s-Range-Extender-17804975/

139. Supplychaindive, FedEx tests hydrogen fuel cell van for deliveries. Available from: https://www.supplychaindive.com/news/FedEx-hydrogen-fuel-cell-van-pilot/522449/

140. GG-LB, 600 Zhongtong Hydrogen Fuel Vehicles on the Road. Available from: http://guba.eastmoney.com/news,000957,814509183.html

141. Sensing today, Another state-owned enterprise layout hydrogen heavy truck. Available from: https://www.sohu.com/a/260034671_384549

142. cnBeta, Nikola releases the third generation hydrogen fuel semi-trailer truck: range between 500 and 1200 kilometers. Available from: http://www.techweb.com.cn/smarttraveling/2018-11-06/2710884.shtml

143. John O'Dell, Toyota's Heavy-Duty Fuel Cell Truck Finally Hits the Road. Available from: https://www.trucks.com/2017/10/12/toyota-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-hits-road/

144. CARB Heavy-Duty & Off-Road Hydrogen and Fuel Cell Activities

145. Futian, Listed company platform. Available from: https://www.yicai.com/brief/100185696.html

146. Jon Leonard, Hydrogen Fuel Cell Future Is Promising for Heavy-Duty Trucks. Available from: https://www.act-news.com/news/hydrogen-fuel-cell-vehicles/

147. Vishnu Rajamanickam, IAA 2018: Hyundai signs MoU for producing heavy-duty fuel cell electric trucks. Available from: https://www.freightwaves.com/news/technology/hyundai-hydrogen-fuel-cell-iaa-2018

148. Transitioning to Zero-emission heavy-duty freight vehicles

149. Hydrogeit, Hydrogen as Option for Heavy-Duty Transport, Available from: https://www.h2-international.com/2018/03/05/hydrogen-as-option-for-heavy-duty-transport/

150. Find.com, "1000 vehicles! Whose car owned the big order of fuel cell heavy truck at the Hanover Motor Show?". Available from: http://dy.163.com/v2/article/detail/DSDKTKLV0527RT9S.html

151. Jon Leonard,. A Toyota's Heavy-Duty Fuel Cell Truck Finally Hits the Road vailable from: https://www.trucks.com/2017/10/12/toyota-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-hits-road/

152. H2-share, Project archive. Available from: https://fuelcelltrucks.eu/project/

153. H2-share, ESORO: heavy-duty fuel cell truck. Available from: https://fuelcelltrucks.eu/project/esoro/

154. Wallace Wade, Heavy-Duty Truck Fuel Efficiency and GHG Emissions Standards. Available from: http://achatespower.com/heavy-duty-truck-standards/

155. Foshan Nanhai Bureau of Development Planning and Statistics, "Development Planning of New Energy Automobile Industry in Nanhai District of Foshan"

156. Sohu, "Accelerating hydrogen energy strategy, Toyota invested in FC forklift trucks and hydrogenation stations"

157. Fuel cell today, "Viessmann to use Hydrogen Fuel Cell Forklift Truck at German Headquarters"

158. Investopedia, "Why Amazon Invested in Plug Power"

159. Vogel Industrial Media, "Hydrogen fuel cell forklifts". Available from: https://www.vogel.com.cn/magazine_journal.html?id=15350

160. China truck, "Weichai has full confidence in hydrogen fuel technology". Available from: http://www.chinatruck.org/news/201903/15_82178.html

161. China forklift, "Where is the road for fuel cell forklift". Available from: http://www.chinaforklift.com/news/detail/201802/60449.html

162. China forklift, "The application of hydrogen fuel cell in forklifts field is just around the corner ". Available from: http://www.chinaforklift.com/news/detail/201807/62367.html

163. P. VALICEK and F. FOURIE, FUEL CELL TECHNOLOGY IN UNDERGROUND MINING. Available from: https://www.platinum.org.za/Pt2014/Papers/325-Valicek.pdf

164. 360che, Weichai and National Energy Group jointly develop hydrogen energy mining trucks. Available from: http://www.360che.com/news/181012/102503.html

165. Neil Hume, Anglo American boss has no plans to leave. Available from: https://www.ft.com/content/72a34edc-aeed-11e9-8030-530adfa879c2

166. Data collection and interviews with Ballard Power Systems

167. American Fuel Cell Bus Project Evaluation: Second Report

168. Auto Kr, New Policy! London diesel cars are taxed up to 27 pounds. Available from: http://www.sohu.com/a/127684925_478941

169. Subject Matter Expert interview, Operations Manager, Qingcheshulu, conducted on August 15 by Deloitte

170. Re-Fire website, About us, Available from: http://www.re-fire.com/

171. Furuise website, About us, Available from: http://www.furuise.com/

172. Liu Kecheng, STNE CEO interview, Available from: http://www.sohu.com/a/245117577_100208285

173. CY Capital, News report on 500 fuel cell vehicle in Shanghai, Available from: http://www.qhcyzb.com/news/shownews.php?lang=cn&id=76

174. Sohu, "STNE signed investment agreement with Air"Available from: http://www.sohu.com/a/242531290_100208285

175. Sohu, "600 FCEV will be put into operation in Shenzhen", Available from: http://www.sohu.com/a/299614626_120044724

176. Dongfeng special vehicle, Products display, http://dfsv.com.cn/show-31-83.html

177. D1CM, Illustration for battery logistics vehicles-Model SE7 of Senyuan, http://news.d1cm.com/20190520104795.shtml

178. 360che, JAC products display, https://product.m.360che.com/m269/67328_index.html

179. Aumark, Products display, http://aumark.foton.com.cn/aumark/car/modelDetail/41

180. ThePaper, Shanghai will build 510 hydrogenation stations by 2020, initially forming a hydrogen Corridor around Shanghai. http://tech.ifeng.com/a/20190606/45535857_0.shtml

181. Jiangqiao town, "Jiangqiao First Hydrogen Station Laid a Foundation", http://www.jiading.gov.cn/jiangqiao/xwzx/jjxw/content_452936

182. IHS Markit, The number of new energy vehicles registered in Shanghai reached a record high in 2018, https://www.d1ev.com/kol/86947

183. Sohu, Shanghai will launch 3000 pure electric logistics vehicles from next year, http://www.sohu.com/a/42033563_114771

184. Wind, Shanghai light duty trucks monthly licensing

185. CRNTT, "Shanghai will implement new emission limits for diesel vehicles", http://www.crntt.com/doc/1053/5/1/0/105351020.html?coluid=7&kindid=0&docid=105351020&mdate=0301173343

186. 360che, "A "black market" trading chain has been formed for the reselling of truck permits?", http://www.360che.com/news/160607/58348.html

187. D1EV, "Shanghai encouraged new energy trucks, and issued 3000 permits", https://www.d1ev.com/news/zhengce/43096

188. Draft amendment to the Credit Management of PV Average Fuel Consumption and NEV Points (for discussion)

189. CNEV, Zhou Fugeng, deputy of the National People's Congress, suggested introducing the "double integral" policy into the field of commercial vehicles. http://k.sina.com.cn/article_5618905561_14ee9b1d9019005df3.html?from=auto&subch=iauto

190. Port of Los Angeles, Facts-and-figures, https://www.portoflosangeles.org/business/statistics/facts-and-figures

191. Stephen Edelstein, Toyota's 'Project Portal' brings a hydrogen-powered big rig to L.A., https://www.digitaltrends.com/cars/toyota-project-portal-hydrogen-fuel-cell-truck/

192. Aaron Turpen, Toyota powers big rigs with hydrogen fuel cells, https://newatlas.com/toyota-portal-project/49132/

193. Wheel infor, To contribute to environmental protection, and adhere to zero emissions! Toyota will push the second generation hydrogen-powered truck, http://news.bitauto.com/hao/wenzhang/881460

194. Aaron Turpen, Toyota reveals Project Portal Beta fuel cell truck, https://newatlas.com/toyota-project-portal-beta/55701/

195. Alan Adler, 2019 ACT Expo: Kenworth, Toyota Show Production Fuel Cell Truck, https://www.trucks.com/2019/04/22/kenworth-toyota-first-production-fuel-cell-truck-ports/

196. XCAR, Toyota dynamics, http://club.xcar.com.cn/xbb/8101572686.html

197. California fuel cell partnership, station map, https://cafcp.org/stationmap

198. Green Car Congress, Ballard fuel cell modules to power yard trucks at Port of LA in CARB-funded project, https://www.greencarcongress.com/2018/10/20181019-ballard.html

199. Ballard newsroom, Ballard Fuel Cell Modules to Power Yard Trucks at Port of L.A. in CARB-Funded Clean Energy Project, https://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2018/10/18/ballard-fuel-cell-modules-to-power-yard-trucks-at-port-of-l.a.-in-carb-funded-clean-energy-project

200. Zhaozhen, Toyota Second Generation Hydrogen Fuel Heavy Truck has been launched , http://www.chinarta.com/html/2018-8/2018814125742.htm

201. Kyle Field, Toyota Rolls Out Version 2.0 Of Its Hydrogen Fuel Cell Truck, Dubbed The "Beta Truck", https://cleantechnica.com/2018/07/30/toyota-rolls-out-version-2-0-of-its-hydrogen-fuel-cell-truck-dubbed-the-beta-truck/

202. My Electric Vehicle Forums, Toyota Mirai Specifications, http://www.mytoyotamirai.com/toyota-mirai-specifications/

203. Dale Hall, Nic Lutsey, ESTIMATING THE INFRASTRUCTURE NEEDS AND COSTS FOR THE LAUNCH OF ZERO-EMISSION TRUCKS

204. Andrew Papson, Michael Ippoliti, Key-Performance-Parameters-for-Drayage-Truckshttps://calstart.org/wp-content/uploads/2018/10/I-710-Project_Key-Performance-Parameters-for-Drayage-Trucks.pdf

205.Reference.com, How Many Gallons Does a Semi Truck Hold? , https://www.reference.com/vehicles/many-gallons-semi-truck-hold-bbf037d6669bd7b0

206.Jason Hanlin, Truck/Bus Development Challenges -Fueling, Fuel System, Powertrain, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/08/f54/fcto-truck-workshop-2018-6-hanlin.pdf

207.Tom Quimby, Kenworth debuts a fuel cell-powered T680, https://www.equipmentworld.com/kenworth-debuts-a-fuel-cell-powered-t680/

208.Transportation for London, What we do, https://tfl.gov.uk/corporate/about-tfl/what-we-do?intcmp=2582

209.Air products, Transport for London: hydrogen bus project-Bringing hydrogen to London's streets, http://www.airproducts.com/~/media/downloads/case-study/T/en-TFL-case-study.pdf

210.HyFLEET:CUTE, Will see the operation of 47 Hydrogen powered buses in regular public transport service in 10 cities on three continents. https://www.global-hydrogen-bus-platform.com/

211.Nicolas Pocard, Catharine Reid, Ballard Power Systems Inc. , FUEL CELL ELECTRIC BUSES: AN ATTRACTIVE VALUE PROPOSITION FOR ZERO EMISSION BUSES IN THE UNITED KINGDOM

212.Van Hool, Van Hool delivers two fuel cell buses for Londonhttps://www.vanhool.be/en/news/van-hool-delivers-two-fuel-cell-buses-for-London

213.Chris Randall, London: TfL orders 20 fuel cell double-decker buses, https://www.electrive.com/2019/05/13/tfl-orders-20-fuel-cell-double-decker-buses/

214.StreetDeck Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) premiered at Euro Bus Expo, https://fleet.ie/streetdeck-fuel-cell-electric-vehicle-fcev-premiered-at-euro-bus-expo/

215.BYD, K8s display, http://www.bydcv.cn/Front/Project/Detail?categroy=7&articleid=234&boolstate=1

216.Chejiahao, BYD sold ADL Enviro400EV in London over 100. https://chejiahao.autohome.com.cn/info/4364833?reply=reply

217.China buses, Wrightbus, http://www.chinabuses.com/overseas/company_107.html

218.Transportation for London, London's Bus Contracting and Tendering Process, http://content.tfl.gov.uk/uploads/forms/lbsl-tendering-and-contracting.pdf

219.Ballard market, Transit Bus, https://www.ballard.com/markets/transit-bus

220.Green Car Congress, Transport for London Contracts with Air Products for Hydrogen Refueling for Buses, https://www.greencarcongress.com/2008/03/transport-for-l.html

221.Wikiroutes, Bus route 7 on the map of London, https://wikiroutes.info/en/london?routes=35457

222.Next green car, Car tax bands 2019/20, https://www.nextgreencar.com/car-tax/bands/#q1

223.Electricity Costs for Battery Electric Bus Operation, https://ww3.arb.ca.gov/msprog/bus/ratesanddemand.pdf

224.Fuel Cell Teahouse, In 2018, the total number of hydrogenation stations in the world reached 369. China ranks fourth, http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190219/963695.shtml

225.Transportation for London, Ultra Low Emission Zone, https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone

226.Transportation for London, Lorries, coaches and larger vehicles, https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone/larger-vehicles

227.Energy system division, Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of U.S. Light-Duty Vehicle-Fuel Pathways: A Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment of Current (2015) and Future (2025-2030) Technologies

228.Mia Romare, Lisbeth Dahllöf, The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries – A Study with Focus on Current Technology and Batteries for Light-duty Vehicles, https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf

229.USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, All-Electric Vehicles, https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml#end-notes

230.Kyle Field , Hydrogen Fuel Cell & Battery Electric Vehicles — Technology Rundown, https://cleantechnica.com/2018/08/11/hydrogen-fuel-cell-battery-electric-vehicles-technology-rundown/

231.Xunmin Ou and Xiliang Zhang, Life-Cycle Analyses of Energy Consumption and GHG Emissions of Natural Gas-Based Alternative Vehicle Fuels in China, https://www.hindawi.com/journals/jen/2013/268263/

232.Bossel, Ulf. "Does a Hydrogen Economy Make Sense?" Proceedings of the IEEE. Vol. 94, No. 10, October 2006 https://phys.org/news/2006-12-hydrogen-economy-doesnt.html

233.USDOE Hydrogen Analysis Resource Center: Hydrogen Production Energy Conversion Efficiencies: Current Technologies

234.Qingbaihuatong, Energy Conversion Efficiency Comparison between Pure Electric Vehicle and Gasoline Engine Vehicle, https://www.tyncar.com/diandongche/20140606-10402.html

235.Xu Ting, Zhng Lei, Huang Yiqiao, Analysis on energy consumption efficiency of electric vehicle and the solutions to improve fuel consumption economic, https://max.book118.com/html/2017/0726/124388703.shtm

236.360che, Whther BEVs produce more pollution than ICEVs during the whole lifecycle. http://www.360doc.com/content/18/0226/09/51477542_732523941.shtml

237.Loss standards for oil products transportation, https://max.book118.com/html/2017/0514/106798278.shtm

238.Chen Qingquan. Modern electric vehicle technology. Beijing institute of technology press, 2002.

239.ZXHGLX, Comparison of Energy Consumption between Electric Vehicle and ICE Vehicle, https://wenku.baidu.com/view/d897933fa32d7375a41780ba.html

240.National Energy Bureau of China. China Energy Development Report 2011; China Economic Press: Beijing, China, 2011

241.National standards, GB11085-1989-Loss of bulk petro liquid, https://max.book118.com/html/2018/1214/8007010056001137.shtm

242.DoE, Comparison of Fuel Cell Technologies, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies

243.Eberle, Ulrich and Rittmar von Helmolt. "Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview". Energy & Environmental Science, Royal Society of Chemistry, 14 May 2010, accessed 2 August 2011

244.The Strategic Position of Manual Hydrogen Production and Hydrogen Industry in China's Energy Autonomy

245.Hydrogen Tools, Hydrogen analysis resource center, https://h2tools.org/hyarc

246.International energy agency, The future of hydrogen (2019)

247.Parthasarathy P, Narayanan KS, Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield - a review. Renewable Energy 2014;66(3

248.Marco Miotti, Johannes Hofer, Christian Bauer, Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles

249.The essential chemical industry, Hydrogen introduction, http://essentialchemicalindustry.org/chemicals/hydrogen.html

250.Joshua A. Krisch3, Clever New Ways to Store Solar Energy, https://www.popularmechanics.com/science/energy/a9961/3-clever-new-ways-to-store-solar-energy-16407404/

251.RenewEconomy, Giles Parkinson, The Long-Term Energy Storage Challenge: Batteries Not Included , https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-long-term-storage-challenge-batteries-not-included

252.World nuclear, Renewable Energy and Electricity, https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/renewable-energy-and-electricity.aspx

253.Jiekun Electricity, Is there will be a negative electricity price? http://news.bjx.com.cn/html/20160323/718680.shtml

254.USDOE, Hydrogen Production: Natural Gas Reforming, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming

255.USDOE, Hydrogen Production and Distribution, https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html

256.Haitong Securities, Hydrogen industrial chain will accelerate, https://max.book118.com/html/2019/0423/5331203112002031.shtm

257.Japan Ministry of Economy, Trade and Industry, Hydrogen Roadmap(2014) and Hydrogen strategy(2017)

258.IHSMarkit, Current Situation of Hydrogen Energy Development in Europe and Its Enlightenment to China, http://www.sohu.com/a/326195088_99964894

259.Development Status and Trend Analysis of Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology in Germany, https://www.kanzhun.com/news/240246.html

260.Anthony Kosturjak, Tania Dey, Michael D. Young, Steve Whetton, Advancing Hydrogen: Learning from 19 plans to advance hydrogen from across the globe, https://www.energynetworks.com.au/sites/default/files/072619_advancing_hydrogen_-_learning_from_19_plans_to_advance_hydrogen_from_across_the_globe.pdf

261.Haitong Securities, The strategic position of artificial hydrogen production and hydrogen industry in China's energy independence, http://caifuhao.eastmoney.com/news/20190810092519118126860

262.Han HAO, Zhexuan MU, Zongwei LIU, Fuquan ZHAO, Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: Chances for the developing world (2018)

263.STE Research Report, Life cycle assessment of hydrogen production methods-A Review (2012)

264.Global Technical Map, Future energy protagonists: hydrogen development history and value chain

265.Chuancai Securities, Fuel cell series report- hydrogen production (2019)

266.Sinolink Securities, Fuel cell value chain series report- hydrogen infrastructure and value chain (2019)

267.USDOE, Hydrogen Delivery Technical Team Roadmap (2017)

268.USDOE, Central Versus Distributed Hydrogen Production, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/central-versus-distributed-hydrogen-production

269.USDOE, Hydrogen Delivery, https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery

270.USDOE, 2015 STORAGE SECTION, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/fcto_myrdd_storage.pdf

271.Florida Solar Energy Center, Hydrogen Basics Introduction, www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/storage.htm

272.Hydrogen Europe, Hydrogen transport & distribution, https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-transport-distribution

273.National Center for Sustainable Transportation, The Development of Lifecycle Data for Hydrogen Fuel Production and Delivery (October 2017)

274.Zhao Manxiang, Technology and Cost Analysis of Hydrogen Storage and Transportation in China, http://www.sohu.com/a/324969570_131990

275.Guangzheng Heng Sang, Hydrogen Transport: Cost Estimation of Different Transport Methods, http://www.sohu.com/a/338475447_658698

276.Joint Study of OEMs and NGOs (Europe, 2010)

277. Efficiency of hydrogen PEFC, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles. 2003

278. Guangzheng Hang Seng, How much can the cost of hydrogen be reduced? —— Storage and Transportation. Available from: http://www.sohu.com/a/334833486_354900

279. LL.LI, SS. FAN, QX.CHEN, G.YANG &YG.WEN, Research and Prospect of Hydrogen Storage Technology. Available from: http://www.360doc.com/content/18/0725/00/32423870_772995121.shtml

280. Prospective Industry Research Institute, Know about hydrogen production and operation chain, https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/180921-46569529.html

281. EunjiYoo, Myoungsoo Kim, Han HoSong, Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea (2018) https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319918326296

282. Liu F et al., The impact of fuel cell vehicle deployment on road transport greenhouse gas emissions: The China case, International Journal of Hydrogen Energy https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.088

283. Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, 2005

284. Ou X, Zhang X, Chang S. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. Energy Policy, 2010, 38(1): 406–418

285. Agora Verkehrswende, Lifecycle Analysis of Electric Vehicles (2019), https://www.agora-verkehrswende.de/en/publications/lifecycle-analysis-of-electric-vehicles-study-in-german-with-english-executive-summary/

286. European Environment Agency, Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives, TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report, 2018

287. Ellingsen, L. and Hung, C., 2018, Research for TRAN committee — resources, energy, and lifecycle greenhouse gas emission aspects of electric vehicles, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, European Parliament, Brussels.

288. Hao, H., et al., 2017, 'GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China', Sustainability

289. Martin Pehnt-Institute for Energy and Environmental Research IFEU GmbH, Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems, http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/fuelcells_lifecycle_pehnt.pdf

290. Daniel Garraín, Yolanda Lechon, Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell, https://www.researchgate.net/publication/259514637_Exploratory_environmental_impact_assessment_of_the_manufacturing_and_disposal_stages_of_a_new_PEM_fuel_cell

291. Elgowainy, A., J. Han, H. Cai, M. Wang, G.S. Forman, and V.B. DiVita, 2014. "Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Petroleum Products at US Refineries," Environmental Science and Technology, doi: 10.1021/es5010347. http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es5010347

292. J.S. Kim, Fuel cell end plates: A review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 9(1):33-46 · January 2008

293. A.S. Woodman, E.B. Anderson, Development of Corrosion-Resistant Coatings for Fuel Cell Bipolar Plates, http://www.psicorp.com/pdf/library/sr-0979.pdf

294. Industrial securities, Fuel cell pull the market, platinum is expected to create brilliance again

295. Wind, Pt price

296. 2017 American Chemical Society, Paving the way for hydrogen fuel cells https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2017/june/paving-the-way-for-hydrogen-fuel-cells.html

297. Dale Hall and Nic Lutsey, Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions, https://theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions

298. Deng Jiajia, Research Report on Lithium Batteries, http://m.elecfans.com/article/653808.html

299. Juda Large, Battery Cost Analysis of New Energy Vehicles, http://www.juda.cn/news/26450.html

300. Sohu, The pollution of lithium mining is becoming more and more serious, http://www.sohu.com/a/246889206_421249

301. Hou Bing, Research on Power Battery Recycling Model of Electric Vehicle

302. National Minerals Information Center, Platinum-Group Metals Statistics and Information, https://www.usgs.gov/centers/nmic/platinum-group-metals-statistics-and-information

303. World platinum investment council, Supply and demand report, https://www.platinuminvestment.com/supply-and-demand/platinum-quarterly

304. Hydrogen Cloud, Platinum usage in FCEVs is controllable, and the market need not be excessively anxious https://www.d1ev.com/kol/90298

305. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap

306. CMS, In-depth report on platinum industry http://vip.stock.finance.sina.com.cn/q/go.php/vReport_Show/kind/search/rptid/4540669/index.phtml

307. Peter Ward, How to extract lithium, https://www.eniday.com/en/human_en/extract-lithium/

308. McKinsey&Co, Lithium and cobalt – a tale of two commodities

309. US department of interior, MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2019

310. Zhenwei Shanghai Battery, Lithium, Cobalt and Nickel status in the World and China, https://www.sohu.com/a/246334072_770503

311. Gavin Montgomery, The rise of electric vehicles and the cobalt conundrum, https://www.woodmac.com/news/editorial/the-cobalt-conundrum/

312. Bloomberg, E-Buses to Surge Even Faster Than EVs as Conventional Vehicles Fade, https://about.bnef.com/blog/e-buses-surge-even-faster-evs-conventional-vehicles-fade/

313. Iyiou, Cobalt is in short of supply: A trend of "high nickel and low cobalt" in lithium batteries appears, https://www.iyiou.com/p/76162.html

314. X Technology, Methods and process to recycle and utilize the used fuel cells, http://www.xjishu.com/zhuanli/59/201711313215.html

315. Tang Peng, Study on regenerative energy of the electric vehicles, https://www.docin.com/p-1385509639.html

316. Department for transportation, Platinum and hydrogen for fuel cell vehicles, https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20120215034549/http://www2.dft.gov.uk//pgr/roads/environment/research/cqvcf/platinumandhydrogenforfuelce3838.html

317. Dunn, J., et al., 2015, 'The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction', Energy and Environmental Science 8

318. Tagliaferri, C., et al., 2016, 'Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach', Chemical Engineering Research and Design 112

319. Van Mierlo, J., et al., 2017, 'Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment', Transportation Research Procedia 25

320. Bloomberg, Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2 (2018), https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf

321. Yu Haijun, EV battery recycle status, https://wenku.baidu.com/view/242a2750591b6bd97f192279168884868662b84b.html

322. PLB, Current Situation and Trend of Power Battery Recycling, http://www.sohu.com/a/213479300_470482

323. CMS, Report on Recycling and Graded Utilization of Lithium Power Batteries

324. Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks

325. Anika Regett, Wolfgang Mauch, Ulrich Wagner, Carbon footprint of electric vehicles - a plea for more objectivity, https://www.ffe.de/attachments/article/856/Carbon_footprint_EV_FfE.pdf

326. André Sternberg, Christoph Hank und Christopher Hebling, GREENHOUSE GAS EMISSIONS FOR BATTERY ELECTRIC AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES WITH RANGES OVER 300 KM, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_LCA-BEV-FCEV-Results.pdf

327. Bloomberg, lithium Batteries' Dirty Secret: Manufacturing Them Leaves Massive Carbon Footprint, https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/lithium-batteries-dirty-secret-manufacturing-them-leaves-massive-carbon

328. Hubert Lipinski, Paul Martin, What is the content of pure lithium in Li-ion batteries used in electric vehicles

329. Christopher Arcus, Tesla Model 3 & Chevy Bolt Battery Packs Examined, https://cleantechnica.com/2018/07/08/tesla-model-3-chevy-bolt-battery-packs-examined/

330. Mark Kane, Deep Dive: Chevrolet Bolt Battery Pack, Motor And More, https://insideevs.com/news/329695/deep-dive-chevrolet-bolt-battery-pack-motor-and-more/

331. UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead?, www.advantagelithium.com/_resources/pdf/UBS-Article.pdf, https://www.d1ev.com/kol/53223

332. Jeff Desjardins, The Critical Ingredients Needed to Fuel the Battery Boom, http://www.visualcapitalist.com/critical-ingredients-fuel-battery-boom

333. Focus Economics, Base Metals Price Outlook, http://www.focus-economics.com/commodities/base-metals

334. BYD Qin EV450 parameters, http://www.bydauto.com.cn/auto/carShow.html-param=秦EV450

335. Seminar Presentation by Plug Power

336. Jackson Carr, Chinese Fuel Cell Industry Developments, www.fchea.org/in-transition/2019/2/4/chinese-fuel-cell-industry-developments

337. Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, Road Map to a US Hydrogen Economy, available on http://www.fchea.org/us-hydrogen-study

338. UPS, UPS To Test New Electric Vehicle, https://www.pressroom.ups.com/pressroom/ContentDetailsViewer.page?ConceptType=PressReleases&id=1532964104882-384

339. China Automotive News, CAMC steadily promotes new energy trucks to market, http://www.cnautonews.com/tj/xny/201905/t20190529_613066.html

考研资料：数学、英语、政治、管综、西综、法硕等（整合各大机构）
英语类：四六级万词班专四专八雅思等
财经类：初级会计、中级会计、注册会计、高级会计、税务师、会计实操、证券从业、基金从业、资产评估、初级审
公务员：国考、省考、事业单位、军队文职、三支一扶微信 2270291360
银行：银行招聘、笔试、面试
教师资格：小学、中学、教师招聘面试
建筑：一建、二建、消防、造价
法考：主观题、客观题
多平台网课：涵盖职场、办公技能、编程、文案写作、情感心理、穿搭技巧、理财投资健身减肥摄影技术等优质内容
精选资料：Excel 教程、PPT 模板、简历模板、PS 教程、PPT 教程、素描、烹饪、小语种、CAD 教程、PR 教程、UI 课程、自媒体、写作、计算机二级、钢琴、Python、书法、吉他、kindle 电子书、演讲.....持续更新中...
押题：提供考前冲刺押题（初级会计、中级会计、注册会计、一建、二建、教资、四六级、证券、基金、期货等等），麻麻再也不用担心我考不过了。
资料领取微信：1131084518
行业报告：20000 份+持续更新

英语四六级备考资料	计算机二级备考资料	150 所高校考研专业课资料
两小时搞定毛概马原思修近代史纲	高数(微积分)+线性代数+概率论	素描 0 基础入门教程
教师资格证全套备考资料	普通话考试资料礼包	书法教程微信 2270291360
大学生英语竞赛备考资料	大学生数学竞赛备考资料	1000 份各行业营销策划方案合集
挑战杯/创青春/互联网+竞赛资料	电子设计竞赛必备资料	街舞 0 基础入门教程
托福雅思备考资料	大学物理学科攻略合集	动漫自学教程
SCI 最全写作攻略	TEM4/TEM8 专四专八备考资料	教师资格证面试试讲万能模板
360 份精美简历模板	数学建模 0 基础从入门到精通	100 套快闪 PPT 模板
Vlog 制作最全攻略	超强 PR 模板	42 套卡通风 PPT 模板
PS 零基础教程微信 1131084518	PS 高级技能教程	63 套酷炫科技 PPT 模板
好用到极致的 PPT 素材	128 套中国风 PPT 模板	32 套 MBE 风格 PPT 模板
327 套水彩风 PPT 模板	295 套手绘风 PPT 模板	54 套毕业答辩专属 PPT
196 套日系和风 PPT 模板	82 套文艺清新 PPT 模板	57 套思维导图 PPT 模板
163 套学术答辩 PPT 模板	53 套北欧风 PPT 模板	34 套温暖治愈系 PPT 模板
118 套国潮风 PPT 模板	30 套仙系古风 PPT	126 套黑板风 PPT 模板
114 套星空风格 PPT 模板	192 套欧美商务风 PPT 模板	42 套绚丽晕染风 PPT
50 套精美 INS 风 PPT 模板	56 套水墨风 PPT 模板	137 套清爽夏日风 PPT 模板
98 套森系 PPT 模板	25 套简约通用 PPT 模板	记忆力训练教程
300 套教学说课 PPT 模板	123 套医学护理 PPT 模板	AE 动态模板微信 2270291360
毕业论文资料礼包	教师资格证重点笔记+易错题集	表情包制作教程
吉他自学教程（送 6000 谱）	钢琴自学教程（送 1000 谱）	区块链从入门到精通资料
2000 部 TED 演讲视频合集	Excel 从入门到精通自学教程	单片机教程
230 套可视化 Excel 模板	1000 款 PR 预设+音效	1000 份实习报告模板
手绘自学教程微信 1131084518	单反从入门到精通教程	人力资源管理师备考资料
英语口语自学攻略	粤语 0 基础从入门到精通教程	证券从业资格证备考资料
日语自学教程	韩语自学教程	PHP 从入门到精通教程
法语学习资料	西班牙语学习资料	炒股+投资理财从入门到精通教程
全国翻译专业资格考试备考资料	BEC 初级+中级+高级全套备考资料	大数据学习资料
SPSS 自学必备教程	Origin 自学必备教程	会计实操资料
LaTeX 全套教程+模板	EndNote 教程+模板	小提琴 0 基础入门自学教程
GRE 超全备考资料	200 份医学习题合集	司考备考资料

思维导图教程＋素材	20000 份行业研究报告	一级造价工程师备考资料

上万 GB 教学资料（均全套,非杂乱）免费领取微信 1131084518

《闪电式百万富翁》实战版+升级版

易经+道德经+易学名师全集+风水学+算命学+起名+++等等（全套 1000 多 GB）

心理学+NLP 教练技术+精神分析+亲子家庭教育+催眠+++等等（更新超 2000GB）

大学-已更新至 9333 个课程+高中+初中+小学-全套资料（超过 2 万 GB）

陈安之	曾仕强	马云	杜云生	翟鸿燊	刘一秒	俞凌雄
王健林	余世维	雷军	周文强	安东尼罗宾	董明珠	李嘉诚
徐鹤宁	冯晓强	李践	刘克亚	罗伯特清崎	戴志强	李伟贤
苏引华	史玉柱	李强	俞敏洪	杰亚伯拉罕	周鸿祎	唐骏
梁凯恩	陈永亮	傅佩荣	贾长松	易发久	李彦宏	湖畔大学
李开复	聂枭	悟空道场	魏星	姬剑晶	其他名师全集	其他资料下载
王兴	王智华	智多星	陈文强	周导		微信 2270291360
泡妞	撩汉	泡仔	房中术	性福课	驻容术	泡妞撩汉性福合集

注：太多了，无法全部一一列出。。。

全套专题系列【微信 1131084518】

记忆力训练	形象礼仪	健康养生	企业管理	沟通技巧
演讲与口才	经理修炼	MBA 讲座	时间管理	战略经营
企业文化	销售心理	管理素质	国学讲座	执行力
团队管理	领导艺术	员工激励	潜能激发	谈判技巧
绩效管理	薪酬管理	43 份直销制度	电话销售	人力管理
客户服务	创业指南	市场营销	餐饮管理	保险讲座
品牌营销	酒店管理	汽车 4S 店	众筹资料	销售技巧

兴趣爱好：	钓鱼教程	魔术教学	炒股教学	美术教学	书法教学	
音乐乐器：	萨克斯教学	电子琴教学	小提琴	古筝教学	钢琴教学	
	吉他教学					
体育运动：	篮球教学	足球教学	羽毛球教学	乒乓球教学	太极拳教学	
	围棋教学	高尔夫球				
生活实用：	插花教学	茶艺-茶道	唱歌教学	单反相机摄影	毛线编织	
	小吃+美食					暗号：666
语言学习：	英语					免费领取资料微信
电脑 IT：	办公 office	PS 美工教学				1131084518

微信1131084518
撩汉liaohan.net
最好资源zuihaoziyuan.com




START YOUR FINANCE



起点财经，网罗天下报告